



Etude théorique et expérimentale de l'usure des outils de découpe : influence sur la qualité des pièces découpées

Hamid Makich

► To cite this version:

Hamid Makich. Etude théorique et expérimentale de l'usure des outils de découpe : influence sur la qualité des pièces découpées. Mécanique [physics.med-ph]. Université de Franche-Comté, 2011. Français. NNT : 2011BESA2035 . tel-01068646

HAL Id: tel-01068646

<https://theses.hal.science/tel-01068646>

Submitted on 26 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

présenté à

**L'UFR DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'UNIVERSITÉ DE
FRANCHE-COMTÉ**

pour obtenir le

GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ
Spécialité:

Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques

**Etude théorique et expérimentale de l'usure des outils de découpe;
Influence sur la qualité des pièces découpées**

par

Hamid MAKICH

Soutenue le 19 Janvier 2011 devant la Commission d'Examen :

Président du Jury	Y. CHASTEL, Professeur, École des mines Paristech (Sophia-Antipolis), Directeur du CEMEF (Centre de mise en forme des matériaux).
Rapporteurs	R. HAMBLI, Professeur des Universités à Polytech' Orléans. F. RONDE-OUSTAU, Professeur, Ecole nationale supérieure des techniques industrielles et des mines d'Albi Carmaux.
Examineurs	G. MONTEIL, Directeur de la thèse, Professeur, Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques, Besançon. Directeur de la thèse. P. PICART, Co-directeur de la thèse, Professeur, Université de Franche-Comté, Besançon. Codirecteur de la thèse. A. MAILLARD, Service Découpage Emboutissage, Cetim. F. GREBAN, Responsable Process, Société Diehl Augé Découpage, Besançon.

Table des matières

1. CHAPITRE 1 : PROCEDE DU DECOUPAGE, BIBLIOGRAPHIE ET PROBLEMATIQUE.....	13
1.1. INTRODUCTION	13
1.2. GENERALITES	13
1.2.1. Principe du découpage des tôles minces	14
1.2.2. Différentes phases d'une opération de découpe	16
1.2.3. Découpage progressif	18
1.2.4. Paramètres influant sur le procédé de découpage	20
1.3. COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE LORS D'UNE OPERATION DE DECOUPAGE	24
1.3.1. Frottement poinçon / tôle	24
1.3.2. Usure des outils de découpage.....	25
1.3.3. Quantification de l'usure des poinçons.....	29
1.4. QUALITE DE LA DECOUPE.....	31
1.4.1. Caractérisation d'une opération de découpage	32
1.4.2. Bavure de découpe	35
1.4.3. La relation entre l'usure et la qualité géométrique du bord découpé.....	41
1.5. SIMULATION NUMERIQUE DU PROCEDE DE DECOUPAGE.....	42
1.5.1. Aspects abordés par la simulation numérique du découpage	42
1.5.2. Simulation de l'usure des outils	47
1.5.3. Prédiction numérique de l'aspect d'un bord découpé.....	48
1.6. CONCLUSION	49
2. CHAPITRE 2 : CARACTERISATION DES MATERIAUX.....	55
2.1. INTRODUCTION	55
2.2. MATERIAUX ETUDIES.....	56
2.2.1. Nuances des tôles étudiées	57
2.2.2. Matière des poinçons utilisés	58
2.3. CARACTERISATION STRUCTURALE DES TOLES	59
2.3.1. Techniques de caractérisation utilisées.....	59
2.4. CARACTERISATION MECANIQUE DES TOLES	62
2.4.1. Essais de microdureté Vickers	62
2.4.2. Essais de traction uni-axiale	62
2.4.3. Essais de frottement et abrasivité des nuances de tôles étudiées	65
2.5. CONCLUSION	80
3. CHAPITRE 3 : METHODES DE MESURES DE L'USURE DES POINÇONS ET DE LA QUANTITE DES BAVURES LORS DU DECOUPAGE.....	84
3.1. INTRODUCTION	84
3.2. ESSAIS DE DECOUPAGE SUR PRESSE	85
3.2.1. Configuration des essais de découpage	86
3.2.2. Paramètres étudiés.....	88
3.2.3. Organisation de la campagne d'essais.....	89
3.3. MESURE DE L'USURE	93
3.3.1. Mesures Ex situ	94
3.3.2. Mesures In situ	100
3.4. METROLOGIE DES PIECES DECOUPEES.....	117
3.4.1. Observation du profil de découpe	118
3.4.2. Mesure de la bavure.....	119
3.5. CONCLUSION	128
4. CHAPITRE 4 : RESULTATS EXPERIMENTAUX.....	134
4.1. INTRODUCTION	134
4.2. RESULTATS DES MESURES EXPERIMENTALES	134

4.2.1.	<i>Métrologie des poinçons avant les essais de découpage.....</i>	<i>134</i>
4.2.2.	<i>Mesure et suivi de l'usure des poinçons.....</i>	<i>138</i>
4.2.3.	<i>Métrologie des poinçons après les essais de découpage.....</i>	<i>163</i>
4.2.4.	<i>Mesure de la qualité des pièces découpées.....</i>	<i>164</i>
4.3.	CORRELATION ENTRE LA CINETIQUE D'USURE DES POINÇONS ET LES TAUX D'USURE DES BILLES.....	170
4.3.1.	<i>Identification de l'abrasivité des tôles - essais tribologiques</i>	<i>170</i>
4.3.2.	<i>Cinétique d'usure du poinçon</i>	<i>171</i>
4.3.3.	<i>Confrontation entre les deux mesures</i>	<i>172</i>
4.4.	CORRELATION ENTRE L'USURE ET LA BAVURE	173
4.5.	CONCLUSION ET SYNTHESE DES RESULTATS	175
5.	CHAPITRE 5 : PREDICTION NUMERIQUE DE L'USURE D'UN POINÇON DE DECOUPAGE	
	181	
5.1.	INTRODUCTION	181
5.2.	MODELISATION ET SIMULATION DU PROCEDE DE DECOUPAGE.....	182
5.2.1.	<i>Problème considéré et démarche de modélisation.....</i>	<i>182</i>
5.2.2.	<i>Définition du maillage.....</i>	<i>183</i>
5.2.3.	<i>Conditions aux limites.....</i>	<i>184</i>
5.2.4.	<i>Gestion du contact.....</i>	<i>185</i>
5.2.5.	<i>Loi de comportement.....</i>	<i>186</i>
5.3.	PREDICTION NUMERIQUE DE L'USURE D'UN POINÇON	188
5.3.1.	<i>Formulation de la loi d'usure d'Archard.....</i>	<i>189</i>
5.3.2.	<i>Algorithme de calcul de l'usure</i>	<i>190</i>
5.4.	VALIDITE DU MODELE NUMERIQUE DU DECOUPAGE	196
5.4.1.	<i>Configuration de référence</i>	<i>197</i>
5.4.2.	<i>Analyse de sensibilité numérique</i>	<i>197</i>
5.4.3.	<i>Analyse de sensibilité aux paramètres du process</i>	<i>199</i>
5.4.4.	<i>Influence des paramètres matériau</i>	<i>204</i>
5.5.	CONFRONTATION ENTRE LES PROFILS D'USURE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE.....	206
5.5.1.	<i>Conditions de modélisation.....</i>	<i>206</i>
5.5.2.	<i>Confrontation entre et le profil d'usure numérique et le profil d'usure expérimental.....</i>	<i>212</i>
5.5.3.	<i>Bilan de la confrontation.....</i>	<i>214</i>
5.6.	CONCLUSION	216

Remerciements

Avant toutes choses, je remercie Messieurs Ridha HAMBLI et François RONDE-OUSTAU d'avoir accepté de rapporter ce travail. Je tiens, également, à remercier Messieurs Yvan CHASTEL, Fabien GREBAN et André MAILLARD qui ont accepté de faire partie du jury de ma thèse.

Cette thèse a été réalisée au sein de l'équipe *Microanalyses des Surfaces (MAS)* du *Département de Mécanique appliquée* de l'institut *Femto-ST (Besançon)*, sous la direction de Monsieur le Professeur Guy MONTEIL. Je tiens à le remercier pour la confiance qu'il m'a accordée, et à lui exprimer ma plus grande reconnaissance pour son aide et ses conseils. Mes remerciements vont aussi à Monsieur le Professeur Philippe PICART, mon co-directeur et qui a toujours été présent pour répondre à mes questions.

Je suis extrêmement reconnaissant à Fabien GREBAN de la société *Diehl Augé Découpage* pour l'accompagnement et le soutien qu'il m'a accordés tout au long des essais expérimentaux de découpage.

Je remercie Edouard FALCONNET et Jérôme CHAMBERT pour leurs contributions dans la partie simulation numérique de ce travail.

Je voudrais remercier Mme Christine MILLOT et M. Claude ROQUES-CARMES pour leurs aides à la réalisation des clichés MEB de mes échantillons.

Je tiens également à témoigner toute mon amitié à tous les membres de l'équipe (*ex-LMS*), pour leur soutien, leurs conseils, ou leur amitié : Veyis, Momo, Cédric, Xavier, Luc, Pierre-Henri, Setha, Olivier, Jo, Kiki, Philippe, Mumu, Christelle, Pascal, Robert, Cécile,.... Je tiens à remercier l'ensemble du personnel technique du département Mécanique appliquée.

Enfin, je remercie infiniment mon épouse, qui est bien plus qu'un soutien incomparable. Bien sûr, j'ai une pensée pour mes soutiens de tous les instants : mes parents, ma famille et mes amis.

A tous merci !

Introduction générale

A. Généralités

B. Objectifs de la thèse

C. Contenu du document

A. Généralités

Le découpage de précision est devenu au fil des années une technique très employée, particulièrement dans la production de pièces dédiées à l'électronique. Cette activité, conduisant à des cahiers des charges toujours plus contraignants, est confrontée à une miniaturisation toujours plus importante des produits fabriqués et subit de plus en plus une concurrence de plus en plus vive. Compte tenu de ces éléments, la maîtrise de la qualité des produits, l'augmentation de la productivité et la réduction des coûts sont indispensables au développement mais aussi à la survie des entreprises concernées. Pour faire face à ces contraintes, les industriels doivent analyser et optimiser l'ensemble des aspects liés aux opérations de production. Dans la mise en forme par découpage mécanique, l'usure des poinçons et la bavure de découpe sont les deux principaux phénomènes à maîtriser.

L'usure peut affecter brutalement la performance du contact entre les poinçons et les tôles dans le processus du découpage. Une augmentation de cette usure est un signe de dégradation du poinçon qui se traduit sur la qualité des produits. En effet, l'évolution de la géométrie d'un poinçon de découpe par usure a des effets directs et préjudiciables sur la qualité géométrique des pièces produites car il est accompagné par l'apparition et l'augmentation de la quantité de bavure sur les pièces découpées. Pour les découpeurs, le niveau de bavure sur les pièces détermine directement leur qualité qui est appréciée par la quantité de bavure acceptable sur les bords découpés. Pour diminuer le nombre de pièces rebutées, à cause de la quantité de bavure, le processus de découpe est arrêté périodiquement. Cet arrêt permet le changement des poinçons ou leur réaffutage quand cela est possible. Seules ces opérations permettent de garantir un niveau de bavure contrôlé sur les pièces découpées. Augmenter la fiabilité et donc la durée de vie des outils permet alors de limiter ces arrêts et aussi de garantir la qualité des produits découpés. Cependant l'usure est un phénomène complexe auquel contribuent simultanément et de manière couplée les propriétés mécaniques, physico-chimiques et topographiques des surfaces dans un contexte de sollicitations souvent multiples. De plus, selon les études bibliographiques, l'ensemble des paramètres du process intervenant dans le découpage contribue également d'une manière significative à l'usure des poinçons ainsi qu'à la qualité du découpage. Meunier [Meunier 2005] signale que la connaissance et la maîtrise des paramètres influant sur le résultat d'un découpage reposent principalement sur un très fort savoir-faire interne aux entreprises mais

peu ou pas sur des bases expérimentales et/ou scientifiques. Toutefois, un intérêt croissant pour des nouvelles méthodes d'investigation est constaté.

Les moyens mis à disposition des concepteurs pour répondre aux différentes questions liées à l'amélioration de la production sont les tests sur prototypes ou le calcul par éléments finis. Par ailleurs, du fait que les productions du monde industriel sont soumises à des contraintes de performance et de fiabilité de plus en plus élevées, les produits doivent être développés dans des délais plus courts afin de garantir la compétitivité face à la concurrence. En conséquence la simulation numérique est une solution adaptée à l'étude des différentes questions liées au découpage industriel. Le calcul par éléments finis est aujourd'hui le meilleur moyen pour optimiser le processus de conception et donc de proposer des produits plus innovants et de qualité plus élevée tout en minimisant les coûts et les délais.

B. Objectifs de la thèse

La raison principale qui motive cette étude réside dans la volonté d'établir une corrélation entre l'évolution de l'usure des poinçons et la quantité de bavure accumulée sur les produits. Pour ce faire, une analyse détaillée de ces deux phénomènes accompagnant l'opération de découpage se doit d'être réalisée. Une grande partie du travail présenté aura donc pour objet le développement et la mise au point de méthodologies de mesure afin de :

- Mesurer l'usure des poinçons « in situ » en fonction des paramètres de découpe,
- Mesurer la quantité de bavure formée.

L'obtention de ces données contribue à partir de leur analyse et de celle des matériaux utilisés à :

- Etudier l'influence des paramètres de découpe (via l'usure du poinçon) sur la qualité de découpe (bavure),
- Corréler la qualité de découpe (bavure) à l'usure du poinçon,

Le but final étant si possible de proposer une modélisation de l'usure (abrasive) des outils de découpe au cours du temps (nombre de cycles).

De ce fait, il aura été nécessaire de développer de nouvelles méthodes pour appréhender par exemple le niveau réel de bavure sur une pièce découpée ou encore le niveau d'usure et sa géométrie sur un poinçon de découpe.

De plus, dans l'optique de réduire les coûts, améliorer la qualité et surtout réduire les délais, un autre volet sera abordé, principalement centré sur la simulation. Celui-ci sera d'une part expérimental, sous la forme d'un nouvel outil de tribométrie permettant d'éviter les essais sur presse lors, par exemple, de la sélection de nouveaux matériaux ou lubrifiants et d'autre part théorique, sous la forme d'un outil numérique permettant la prédiction de l'usure des poinçons de découpe au cours du temps.

C. Contenu du document

Le premier chapitre présente les technologies relatives à la fabrication de produits découpés, l'accent étant mis sur le découpage progressif. Une synthèse, non exhaustive, des travaux scientifiques et plus particulièrement expérimentaux, relatifs à l'étude des paramètres associés au procédé est proposée.

Le deuxième chapitre concerne la présentation des matériaux de l'étude et des moyens mis en œuvre pour la caractérisation de leurs propriétés. Par ailleurs, la conception, le développement et la réalisation d'un système expérimental simple permettant d'étudier l'influence des principaux paramètres du process y sont présentés.

Le troisième chapitre décrit les travaux réalisés sur un outillage de production. Les paramètres majeurs étudiés sont également listés. Il sera également question des méthodes de mesure et de métrologie utilisées lors de nos travaux.

Le quatrième chapitre est dédié à la présentation des résultats obtenus lors des essais expérimentaux.

Dans le cinquième chapitre est abordée une approche théorique prometteuse sur la prédiction de l'usure d'un poinçon. L'accent y est mis sur l'adaptation de la simulation, pour prédire l'évolution de l'état d'usure des poinçons en fonction du nombre de coups de presse lors de la découpe de produits minces.

Enfin, une conclusion rappelle et résume les contributions principales de ce travail, ainsi que les perspectives et les développements restant à réaliser.

Chapitre 1

Procédé du découpage, bibliographie et problématique

Liste des figures

Figure 1. 1: Schématisation du principe du découpage mécanique des tôles.....	14
Figure 1. 2: Représentation d'une ligne de découpage et de ses périphériques [Meunier 2005].....	15
Figure 1. 3 : Les différentes phases de la découpe	16
Figure 1. 4: Représentation de la forme générale de la courbe effort / déplacement [Maillard 1991].....	17
Figure 1. 5 : Représentation schématique de la nucléation, de la croissance et de la coalescence de cavités en traction [Goijsaerts 1999].....	18
Figure 1. 6 : Exemple d'un outil progressif (Source : Diehl Augé Découpage, Besançon).....	19
Figure 1. 7: Principe du découpage progressif [Gréban 2006]	19
Figure 1. 8: Nomenclature des éléments de la géométrie de la découpe [Lemiale 2004].....	20
Figure 1. 9 : Evolution des arêtes de découpe d'un poinçon et d'une matrice	25
Figure 1. 10: Contact pion cylindrique / disque	28
Figure 1. 11 : Géométrie de l'arête coupante du poinçon [Hambli 2003].....	30
Figure 1. 12: Représentation et définition d'un profil type d'un bord découpé.....	32
Figure 1. 13 : Influence du jeu relatif sur l'aspect du bord découpé [Hambli 2004].....	33
Figure 1. 14 : Influence du jeu poinçon/matrice sur la bavure de découpe [Gréban 2006].....	35
Figure 1. 15: Représentation de l'écrasement de la bavure en découpage progressif.....	36
Figure 1. 16: Écrasement de la bavure. [Gréban 2006].....	36
Figure 1. 17: Définition de la hauteur de la bavure	37
Figure 1. 18 : Mesure de la bavure par profilométrie tactile [Gréban 2006]	38
Figure 1. 19: Mesure optique de la bavure de découpe : ombre de la bavure [Gréban 2006]	38
Figure 1. 20 : Profilométrie optique de la bavure écrasée et non écrasée [Gréban 2006].....	40
Figure 1. 21 : Mesure de la surface de bavure par « ombroscopie »	40
Figure 1. 22: Géométrie du bord tranchant du poinçon et de la matrice	42
Figure 1. 23 : courbes effort/déplacement numériques avec la courbe expérimentale [Hambli 2001-b].....	45
Figure 1. 24 : Courbes effort/déplacement pour deux valeurs des rayons r_p et r_m [Touache 2006].....	47
Figure 1. 25 : Influence des rayons de courbure et du jeu sur le profil découpé. Bord découpé obtenu numériquement [Husson 2005].....	49

1. Chapitre 1 : Procédé du découpage, bibliographie et problématique

1.1. Introduction

Dans ce premier chapitre, après avoir rappelé le principe général et les caractéristiques du découpage mécanique des tôles avec une attention particulière portée au cas du découpage progressif, puis précisé la terminologie qui sera utilisée dans la suite du mémoire, nous nous intéresserons plus particulièrement à décrire et à analyser les travaux issus de la bibliographie. Il y sera réalisé un état des lieux sur les actions de recherche et développement dans le domaine du découpage des tôles, et spécifiquement sur l'usure des poinçons et la qualité des pièces découpées. Identifier les acquis et les manques des travaux existants sur l'étude de ce procédé nous aidera à positionner nos propres travaux de recherche.

Le plus souvent, les aspects étudiés dans la littérature sont les paramètres influant sur la qualité de la découpe. Les travaux concernant directement le contact poinçon / tôle dans le découpage sont peu nombreux. Ainsi, nous mettrons l'accent, tant d'un point de vue expérimental que numérique, sur les travaux dédiés à l'étude et l'analyse de l'usure des poinçons et de la formation de la bavure au cours de la mise en forme par découpage.

Nous terminerons en développant les différentes problématiques liées au découpage de produits et qui sont au cœur de nos travaux.

1.2. Généralités

Le découpage mécanique fait partie des procédés de transformation à froid des métaux. Ce type de procédé est de loin le plus pratiqué dans le domaine industriel. Il est effectué sur presse, et intervient notamment pour une large part dans la fabrication des composants dédiés à l'industrie électronique. Parmi tous les procédés industriels de mise en forme, le découpage de tôles est une opération particulière car contrairement à l'emboutissage et au pliage par exemple qui ont pour but de déformer plastiquement la matière des tôles, le découpage sollicite celle-ci jusqu'à la rupture finale.

1.2.1. Principe du découpage des tôles minces

Le découpage consiste à obtenir des pièces par cisailage de tôles. Plus particulièrement il consiste à séparer en deux parties une tôle ou une bande de matière généralement suivant un profil fermé. L'organe principal du procédé est un outil constitué de deux éléments (*figure 1.1*) :

- ↗ Une matrice, qui a un évidement correspondant à la forme de la découpe souhaitée,
- ↗ Un poinçon, avec une forme complémentaire, généralement animé d'un mouvement de translation.

Deux autres éléments principaux entrent en jeu lors du découpage (*figure 1.1*) :

- ↗ Une tôle ou bande de matière à découper,
- ↗ Un dévêtisseur (serre flan), qui a pour fonctions le maintien de la bande au cours du découpage, le guidage précis des poinçons par rapport aux matrices et le dévêtissage des poinçons de la matière découpée.

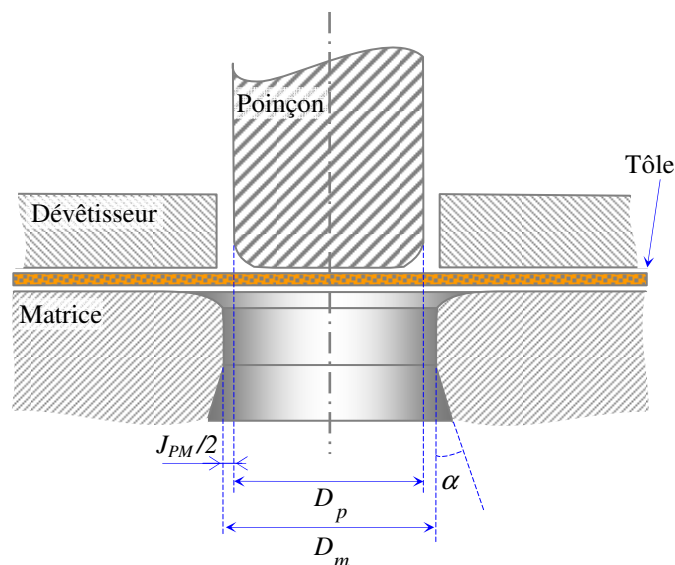


Figure 1. 1: Schématisation du principe du découpage mécanique des tôles

En fonction de la complexité géométrique de la découpe, un outil de découpage peut contenir plusieurs postes de découpage. Il fait partie d'un ensemble d'éléments et d'équipements spécifiques qui assurent la réalisation de la découpe. Cet ensemble est appelé communément une ligne de découpage (*figure 1.2*).

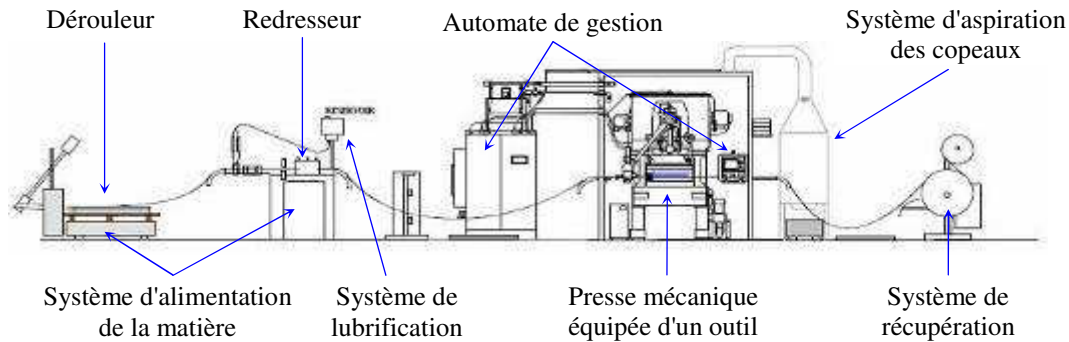


Figure 1. 2: Représentation d'une ligne de découpage et de ses périphériques [Meunier 2005]

Donc, en plus d'un outil de découpage, une ligne de découpage est composée principalement :

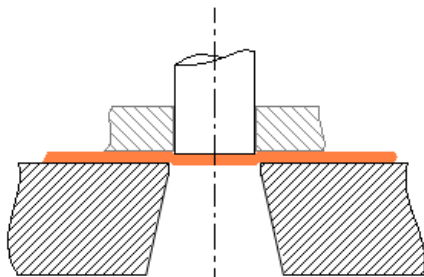
- ↳ D'une presse, qui à chaque coup, transmet à la partie supérieure de l'outil de découpage, fixée sur le coulisseau de la presse, un mouvement vertical alternatif permettant sa descente et sa remontée, la partie inférieure de l'outil étant fixée sur la table de la presse. La presse fournit également l'énergie mécanique nécessaire au découpage (effort de découpage),
- ↳ D'un système d'amenage mécanique, couplé au mouvement du coulisseau de la presse, qui permet l'avance de la bande à découper d'une valeur fixe appelée « pas »,
- ↳ D'un système d'alimentation constitué : d'un dérouleur de bande et d'un redresseur (*figure 1.2*) dont l'unique fonction est de réduire, avant l'entrée de la tôle dans l'outil, les défauts de courbure, tuilage, torsion, [Meunier 2005],
- ↳ D'un système de récupération constitué d'un enrouleur / récupérateur de bande découpée.

Généralement la matrice est la partie de l'outil qui est bridée sur la table de la presse, et le ou les poinçons sont animés d'un mouvement alternatif transmis par le coulisseau, l'organe mobile de la presse. A chaque course, un ou plusieurs découpages sont effectués. Le métal nécessaire à la fabrication alimente l'outil qui associe poinçons et matrices. Il se présente sous la forme de bandes de largeur constante ou sous forme de flans pour les pièces de grandes dimensions. Suivant les applications, c'est la tôle percée ou bien la partie enlevée de la tôle qui constituera la pièce finale.

1.2.2. Différentes phases d'une opération de découpe

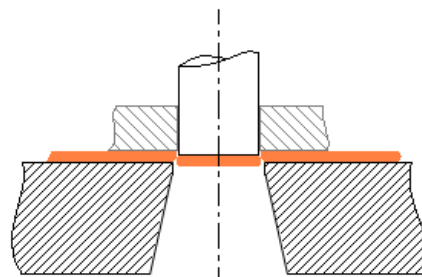
Sous l'action de la contrainte imposée par la partie active du poinçon, il se produit une déformation élastique puis un glissement avec décohésion du métal. Le poinçon poursuit sa course, et provoque la rupture complète de la tôle (*figure 1.3*).

Ainsi, le mouvement de découpe qui correspond à un coup de presse et à la pénétration du poinçon en vue de la découpe (un aller-retour du coulisseau entre le point mort haut et le point mort bas) peut être décomposé en quatre phases principales. Cette pénétration du poinçon doit être minimale afin d'éviter sa détérioration.



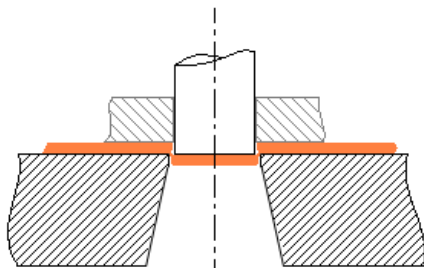
Phase 1 : Phase d'allongement

La tôle se déforme sans se rompre.



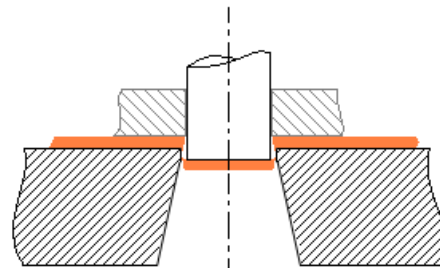
Phase 2 : Phase de fissuration

Le poinçon poursuit sa course et des fissures apparaissent au voisinage des arêtes coupantes, côté matrice et poinçon.



Phase 3 : Phase de la découpe

Les fissures se rejoignent et la pièce est découpée.



Phase d'évacuation

Le poinçon descend toujours et pousse la pièce dans la matrice avant qu'elle soit évacuée.

Figure 1. 3 : Les différentes phases de la découpe

Ces différentes phases d'une opération de découpage ont été associées à la courbe effort / déplacement qui caractérise la découpe. Maillard [Maillard 1991] présente une définition des phases principales de la courbe effort / déplacement du procédé de découpage dans la *figure 1.4*.

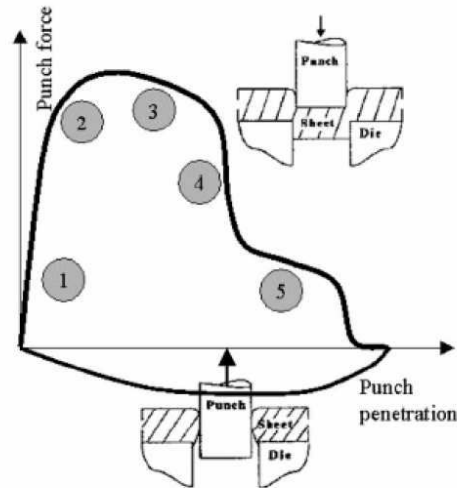


Figure 1. 4: Représentation de la forme générale de la courbe effort / déplacement [Maillard 1991]

Sur cette courbe on observe généralement les phases suivantes ; [Maillard 1991] :

- ↪ Portion 1 : Dans cette partie, l'effort du poinçon évolue de façon linéaire. Le comportement du matériau découpé est élastique.
- ↪ Portion 2 : Il s'agit d'une phase non linéaire correspondant à la déformation plastique de la tôle, avec un écrouissage plus ou moins prononcé suivant le type de matériau.
- ↪ Portion 3 : Il s'agit d'une phase de décroissance non linéaire de l'effort. Parallèlement à la poursuite de la déformation plastique du matériau, l'endommagement se développe progressivement et provoque une perte des caractéristiques mécaniques, donc une diminution de l'effort. Maillard [Maillard 1991] précise que la diminution de l'effort du poinçon observée est consécutive à la diminution de la section en cisaillement.
- ↪ Portion 4 : Dans cette partie, une (ou des) fissure(s) s'amorce(nt) au niveau des arêtes poinçon et matrice. Elle(s) se propage(nt) rapidement, entraînant une chute importante de l'effort enregistré.
- ↪ Portion 5 : La rupture complète de la tôle est effective. La pénétration correspondant à ce point est donc généralement appelée « pénétration à rupture ». Celle-ci est la plupart du temps inférieure à l'épaisseur de la tôle. Cette partie correspond aux efforts de frottement dus à la poussée du copeau dans la matrice lors de la descente du poinçon. Il y a essentiellement frottement entre le poinçon et la tôle ajourée, et entre la matrice et le copeau.

Johnson et Slater [Johnson 1967] utilisent également le diagramme présentant l'effort vertical exercé sur le poinçon en fonction de sa pénétration dans la tôle pour décrire le comportement du matériau au cours de la découpe.

Par ailleurs, Goijaerts et al. [Goijaerts 1999] [Goijaerts 2000], indiquent que la rupture des tôles en découpage est inévitablement une rupture ductile. Elle est causée par la nucléation, la croissance et la coalescence de micro cavités (*figure 1.5*). La croissance et la coalescence de ces cavités aboutissent à la formation de cupules sur le faciès de rupture, la particule responsable de la formation de la cupule est parfois visible en fond de cupule.

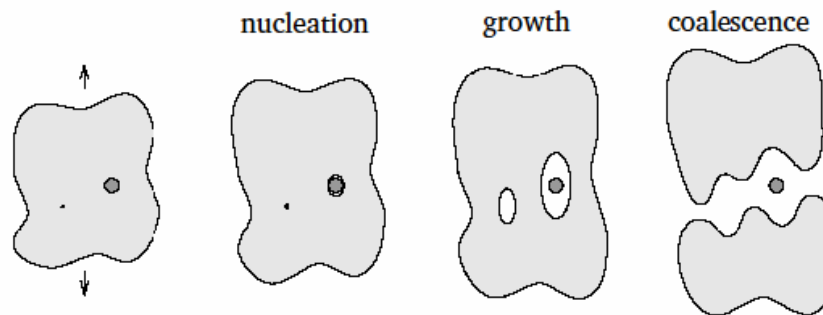


Figure 1. 5 : Représentation schématique de la nucléation, de la croissance et de la coalescence de cavités en traction [Goijaerts 1999]

1.2.3. Découpage progressif

L'activité de conception d'un outil de découpe est un processus complexe dans la genèse des produits découpés. Elle consiste à élaborer un produit ou un système conformément aux exigences d'un client, et dans le respect de certaines règles ou normes, ce qui revient à borner le domaine de création du produit. Elle se doit en outre de garantir la rentabilité financière de l'entreprise. De nouvelles techniques d'usinage, liées au développement de l'électroérosion et de la commande numérique sont apparues et permettent la conception d'outils de plus en plus précis et complexes. De ce fait le découpage progressif a été rendu possible y compris pour des pièces complexes de petites dimensions.

Le découpage progressif est basé sur la réunion en un seul bloc de plusieurs poinçons à poste unique (*figure 1.6*). Cela assure pour des fabrications en grandes séries, un prix de revient minimal. L'outil, plus complexe, qui en résulte comporte alors de nombreux poinçons dont les relations entre eux et avec les ouvertures de la matrice doivent être invariablement fixées. L'ensemble est assujéti par l'élément porte poinçons. L'outil est muni d'un dévêtisseur guide qui a le rôle de guider tous les poinçons pendant la course descendante du

coulisseau de la presse, d'extraire hors de la bande tous les poinçons à la remontée du coulisseau et de s'opposer au flambage, sous l'effort de découpe, de poinçons de faible section.



Figure 1. 6 : Exemple d'un outil progressif (Source : Diehl Augé Découpage, Besançon)

Le découpage progressif est couramment pratiqué dans les entreprises travaillant pour l'industrie électronique. Les outils sont dits progressifs car la tôle est découpée en plusieurs étapes pour former le produit final. La pièce est obtenue en réalisant successivement sur une bande de matière plusieurs contours. Cet outil de découpage, complexe, est donc composé de plusieurs modules interchangeables et porte également le nom d'outil à suivre, du fait que la pièce est obtenue par une suite d'opérations [Meunier 2005].

Un exemple de produit fabriqué par ce procédé est donné par Gréban [Gréban 2006] (figure 1.7). Il présente une progression d'une bande dans un outil progressif. Sur cette bande on trouve les étapes de fabrication des éléments *Leadframe* ⁽¹⁾.

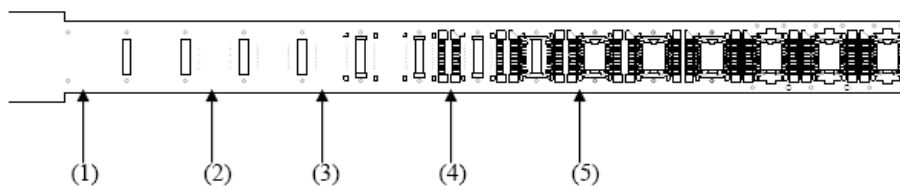


Figure 1. 7: Principe du découpage progressif [Gréban 2006]

(1) ajustement de la largeur de la tôle et perçage des trous de pilotage, (2) découpage de la séparation entre 2 Leadframes, (3) découpage des coins du Leadframe, (4) découpage des connexions, (5) découpage du dissipateur

⁽¹⁾ Le *Leadframe* est un support métallique pour composant électronique (puce). Il permet de relier le composant au circuit imprimé. Il a une double fonction de conduction électrique et de support mécanique [Gréban 2006].

La précision de fabrication et de montage des outils se situe à une échelle de quelques micromètres. C'est l'ensemble des moyens mis en œuvre qui permet d'obtenir une telle précision. Celle-ci est conservée pendant l'exploitation par l'utilisation de presses à découper de très hautes performances.

Sur un même outil progressif, il est possible de réaliser à la fois du découpage, du pliage, ou d'autres opérations de mise en forme. De même l'outil peut devenir partie intégrante d'une unité de production homogène dans laquelle des pièces découpées sont assemblées de diverses façons : par rivetage, sertissage, soudage, agrafage, ... entre elles ou avec d'autres pièces, sur une même presse [Meunier 2005].

Un outil progressif est capable de réaliser une découpe, non plus en une seule fois comme un outil suisse, mais en plusieurs étapes sur un même outil. Meunier [Meunier 2005] précise que cela permet notamment de réduire le nombre d'opérations de reprise.

1.2.4. Paramètres influant sur le procédé de découpage

Dans le procédé de découpage des tôles minces, différents paramètres influencent la création et les caractéristiques du produit fini. Les paramètres géométriques sont ceux qui sont souvent cités en premier. La figure 1.8 présente ces différents paramètres intervenant lors d'une opération de découpe.

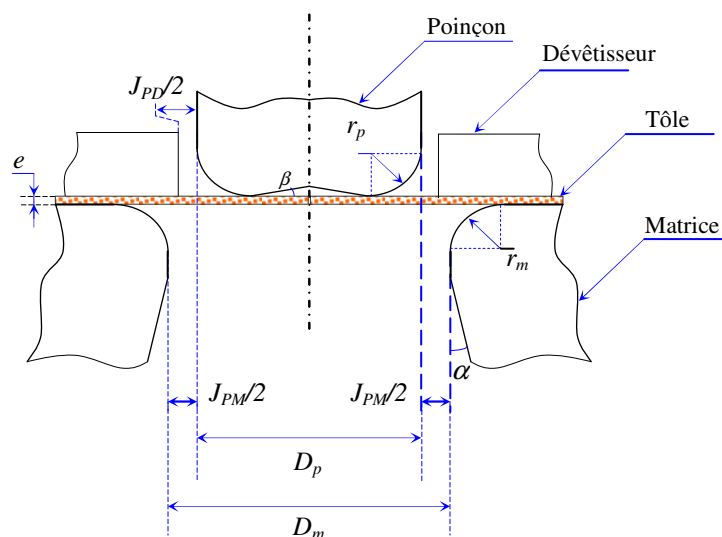


Figure 1. 8: Nomenclature des éléments de la géométrie de la découpe [Lemiale 2004]

Les principales caractéristiques géométriques d'un poste de découpage sont (figure 1.8) :

↳ le jeu poinçon/matrice, J_{PM} : Pour un poinçon de forme quelconque, il est défini comme étant la valeur de l'écart entre le profil de la forme en bout de poinçon et le profil de l'ouverture de la matrice. Ce jeu est fréquemment exprimé en pourcentage de l'épaisseur de la tôle découpée. Hambli [Hambli 2004] présente une relation pour le calcul du pourcentage du jeu relatif entre le poinçon et la matrice rapporté à l'épaisseur de la tôle :

$$J_{PM}(\%) = 100 \frac{D_m - D_p}{e} \quad (1.1)$$

Le jeu entre poinçon et matrice est un facteur important dans l'opération de découpage. Il doit être réparti à égalité sur toute la périphérie du poinçon et de l'ouverture de la matrice. Le jeu a une influence sur l'effort maximal de découpe et également sur le profil des pièces découpées. Meunier [Meunier 2005] montre pour des alliages cuivreux, que le jeu est un paramètre significatif pour l'analyse de l'effort maximal de découpe ainsi que pour sa position sur la courbe effort / déplacement. Il assure que l'effort diminue lorsque le jeu augmente. Chang [Chang 1950] de son côté montre une diminution de 9.2% de l'effort maximal de découpe lorsque le jeu passe de 0 à 20%. Cette tendance est valide pour l'ensemble des matériaux étudiés (Aluminium, Zinc, Cuivre, Laiton, Acier doux, Fonte). En revanche, Johnson et al. [Johnson 1967] montrent que pour un alliage de cuivre (B.S. 1432), la valeur de l'effort maximal reste quasi-constante pour une variation du jeu de 0 à 11%. De plus, Tekiner [Tekiner 2006] et Gréban [Gréban 2006] affirment qu'un jeu trop faible augmente l'effort de découpe et entraîne une usure rapide des outils, en augmentant la pression de contact entre la tôle et l'outil.

↳ Les rayons des arêtes coupantes du poinçon et de la matrice, r_p et r_m : Pour des outils neufs, ces rayons correspondent pratiquement à des angles vifs. L'étude de l'influence des rayons des arêtes de l'outil sur la qualité de la découpe prend une part non négligeable dans les travaux sur le découpage. Tilsley [Tilsley 1958] montre une faible dépendance de l'effort de découpage en fonction de ce rayon. Maillard [Maillard 1991] affirme également que l'usure des poinçons se traduit par une modification de la courbe d'effort de découpe. On observe généralement une légère augmentation de l'effort maximum de découpe, au contraire de l'effort d'expulsion du copeau qui diminue de façon importante [Gréban 2006]. Par ailleurs, Maillard [Maillard 1991] dans son étude de l'effet du nombre de coups de presse sur l'usure des outils, expose une relation quasi-linéaire entre le nombre de coups de presse et la variation des rayons.

↯ L'angle de dépouille sur la matrice, α : Le poinçon ne présente généralement aucune dépouille, ce qui permet de conserver ses dimensions constantes malgré les réaffutages (suite à l'usure). La matrice, pour les mêmes raisons, ne présente aucune dépouille sur quelques millimètres. Ensuite elle est dépouillée pour limiter l'empilage des pièces ce qui diminue les efforts de poussée du poinçon. L'usinage complémentaire de l'ouverture de la matrice est fait en conicité nommée « dépouille » et ce afin de faciliter l'éjection des pièces et des copeaux.

↯ L'angle en bout de poinçon, β : Pour faciliter la découpe, le poinçon peut présenter une pente depuis le bord jusqu'au centre dont la flèche est sensiblement égale à l'épaisseur du produit. A partir des travaux de Chang [Chang 1950], qui portent sur l'angle au bout du poinçon, on peut affirmer que l'augmentation de cet angle provoque :

- Une diminution de l'effort maximal de découpe.
- Une augmentation de la pénétration du poinçon à effort maximal.
- Une diminution de la pente de la courbe effort / déplacement correspondant à la phase d'allongement.
- Une stabilité de l'énergie de découpe.

↯ Le jeu poinçon dévêtitseur, J_{PD} , caractérise la précision du guidage du poinçon.

D'autres éléments interviennent dans le découpage et influencent le résultat de la découpe. Ils sont liés au procédé. Parmi ces paramètres il y a essentiellement :

↯ La vitesse de découpe : Johnson et al [Johnson 1967] a observé qu'une augmentation de la vitesse de coupe entraîne une augmentation de la partie cisailée dans le profil de découpe du cuivre *Cuc1*. Cependant, Meunier [Meunier 2005] a observé que des variations de cadence, pour la découpe d'un cuivre Cub1 H12 (de 100 à 500 coups/min, soit en approximation de 0.04 à 0.2m.s-1), n'entraînent pas de modifications observables sur le profil, alors qu'un effet est observé sur l'effort de découpe. En effet il remarque une diminution de l'effort qui peut être associée à un effet thermique (adoucissement). Cependant, Balendra [Balendra 1970] précise que l'influence de la vitesse de découpe sur le profil dépend des caractéristiques des matériaux découpés. Plus récemment, Stegeman et al. [Stegeman 1999] ainsi que Meunier [Meunier 2005] ont étudié également l'influence de la vitesse en découpage. Ces travaux se sont concentrés généralement sur l'évaluation de l'influence de la vitesse sur l'effort maximal de découpage et le profil de découpe. En effet, pour tous les matériaux étudiés, ils ont observé

que l'effort maximal de découpage diminue et la hauteur de la zone cisailée augmente lorsque la vitesse de découpage augmente.

✎ La lubrification : La cinétique d'usure des poinçons est fortement conditionnée par la nature et la quantité de lubrifiant employées lors de la découpe. Gréban [Gréban 2006] insiste sur le fait que dans le cas d'une lubrification insuffisante, cela entraîne un collage immédiat de la matière découpée sur l'outil découpant. Le phénomène est particulièrement important par exemple dans le cas du découpage du cuivre par des outils en carbure de tungstène en raison d'une forte affinité chimique entre le cuivre et le cobalt (liant des grains de carbure de tungstène) [Gréban 2006].

✎ La température : L'influence de la température sur le comportement des tôles dans le découpage est très importante. Pourtant peu d'études traitent cet aspect. Zunkler, cité par Touache [Touache 2006], présente l'influence de l'augmentation de la température sur l'effort maximal de découpe ; il y a diminution de l'effort maximal lors de l'augmentation de la température.

✎ L'effort d'extraction : Après un découpage, la tôle a tendance à rester solidaire du poinçon. Pour effectuer le dégagement, les outils sont munis d'un dévêtitseur. L'effort nécessaire pour effectuer cette extraction est évalué selon l'importance de la surface de tôle entourant le poinçon entre 2 et 7 % de l'effort nécessaire à la découpe.

D'autres auteurs ont étudié également l'influence des propriétés des matériaux sur le procédé d'une manière générale. Il s'avère que le comportement en découpage varie de façon très importante suivant la nature du matériau, de sa composition et de sa microstructure. Cela est confirmé par Maillard [Maillard 1991] et Hambli [Hambli 1996]. Concernant la dureté du matériau, Balendra et al. [Balendra 1970] ont réalisé un ensemble d'essais de découpage pour le même matériau (acier) avec des duretés différentes. Ils ont constaté que l'effort maximal de découpage augmente de façon quasi linéaire avec l'augmentation de la dureté et que la pénétration à rupture diminue. Un autre paramètre, qui a son importance dans l'opération de découpage, est donc la microstructure du matériau découpé. En effet, l'épaisseur faible des tôles découpées dans le découpage de précision a conduit Goijaerts [Goijaerts 1999], à s'intéresser à l'influence de la taille des grains sur la découpe. Il constate une diminution de l'effort de découpage lorsque la taille des grains augmente. Il conclut que plus l'épaisseur de

la tôle est faible, plus la densité de joints de grains diminue, et donc moins d'obstacles sont présents pour les mouvements des dislocations.

1.3. Comportement tribologique lors d'une opération de découpage

Par définition, la tribologie est la science relative aux surfaces à action réciproque en mouvement relatif, donc aux phénomènes de frottement de glissement et d'usure. Ceux-ci interviennent lorsque deux surfaces solides en contact glissent l'une sur l'autre. Un système tribologique (ou un tribosystème) se définit comme un système mécanique, formé de deux matériaux antagonistes, maintenus en contact par l'action d'une force, animés d'un mouvement relatif, séparés ou non par un troisième corps et placés dans un environnement de travail.

Lors d'une opération de découpage, un frottement a lieu entre la matrice et la tôle et entre le poinçon et la tôle. Le champ de notre étude sera consacré à l'analyse des travaux concernant le système tribologique poinçon / tôle.

1.3.1. Frottement poinçon / tôle

L'arête d'un poinçon est soumise à des sollicitations mécaniques et thermiques très sévères au contact de la tôle à découper. Ces dernières sont dues aux contraintes statiques et dynamiques et aux frottements que subit cette arête lors de la découpe. Le frottement d'un poinçon et d'une tôle peut être décomposé en deux étapes; la première étape a lieu lors de la descente du poinçon, qui rentre en contact avec la tôle sur son arête de découpe et la deuxième étape a lieu lors de la remontée du poinçon après rupture de la tôle. Généralement, à la deuxième étape on associe l'action du dévêtissage du poinçon. La force mesurée au cours du dévêtissage, F_{devet} , d'un poinçon correspondant à son extraction, traduit le frottement du poinçon sur la tôle découpée, qui applique un effort de serrage, $F_{serrage}$, par retour élastique sur le poinçon. Ainsi, on peut définir cette force de dévêtissage par la formule suivante [Gréban 2006] :

$$F_{devet} = \mu * F_{serrage} \quad (I. 2)$$

(avec μ le coefficient de frottement poinçon / tôle).

Le frottement entre poinçon et tôle varie principalement en fonction de la nature de la matière de ce couple et de l'état de surface du poinçon.

1.3.2. Usure des outils de découpage

L'usure est le processus d'endommagement des surfaces en contact, sous l'effet du frottement. Il s'agit d'un phénomène incontournable dans tous les contacts mécaniques tel le processus de mise en forme par découpage. Dans ce secteur, les éléments affectés par les phénomènes d'usure sont les poinçons et les matrices. Au cours du procédé ils subissent une usure progressive de leurs parties actives, modifiant ainsi par exemple le rayon de courbure sur les arêtes de découpes de ces éléments [Gréban 2006] (*figure 1.9*).

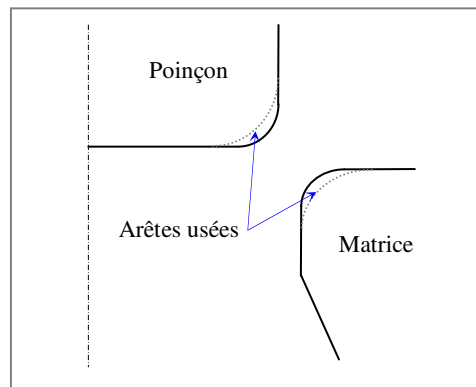


Figure 1. 9 : Evolution des arêtes de découpe d'un poinçon et d'une matrice

La variation de ces dimensions a pour première conséquence l'augmentation de la valeur du jeu poinçon / matrice, mais également celui de l'effort nécessaire au découpage. Dans la littérature, l'élément le plus étudié est le poinçon. Son usure est constituée de trois étapes reliées les unes aux autres et qui se déroulent successivement. Il subit donc tout au long de sa vie les étapes d'usure suivantes :

- ↳ Rodage : usure rapide avec une vitesse d'usure régulièrement décroissante,
- ↳ Marche normale : conditionne la durée de vie du poinçon (usure faible et constante),
- ↳ Vieillesse et mort : vitesse d'usure croissante, voire casse du poinçon dans certains cas.

Par conséquent, la capacité à prévoir l'usure des poinçons et l'aptitude à évaluer leur durée de vie sont d'une importance primordiale pour les découpeurs. En prévision de leur usure les poinçons sont conçus de façon à être affûtés après usure. Ils doivent également résister à la compression et au flambage.

Comme on a vu que la dimension des poinçons conditionnait la qualité des pièces produites, il est donc capital de comprendre le mécanisme et la cinétique de l'usure des poinçons afin d'en accroître la durée de vie.

1.3.2.1. Définition de l'usure

L'usure est un phénomène complexe. Elle peut être définie comme la perte ou le déplacement non désiré de matière à la surface d'un solide en mouvement relatif ou en contact avec un autre solide. Cela se traduit par une perte de masse, modification de cotes ou de forme, et s'accompagne généralement de transformations physiques et chimiques des surfaces. Par ailleurs, Woydt [Woydt 2004] cite la norme *DINEN 50321* dans laquelle l'usure peut être caractérisée par n'importe quel changement de longueur, volume ou masse d'un corps.

Par conséquent, l'usure d'un poinçon peut être définie comme une dégradation graduelle de sa surface active provoquée par le frottement entre l'outil et la tôle. Pour quantifier cette usure on peut par exemple introduire le taux d'usure qui exprime la perte de matière en fonction de la distance parcourue sous une charge donnée. Le taux d'usure décrit l'évolution du niveau d'usure d'un couple de matériau dans les conditions opératoires d'un système. Maillard [Maillard 1991], précise que le taux d'usure ne traduit pas directement une propriété intrinsèque des matériaux en contact ou du tribosystème.

Comme on le verra par la suite (§ 1.3.2.2) suivant le mécanisme de cette usure il est possible de la réduire par plusieurs moyens correspondant aux différentes variables qui l'influencent. Ceux qui sont le plus souvent utilisés sont généralement les plus aisés à modifier comme la nature des matériaux de poinçon ou encore la lubrification durant la découpe [Felder 2006]. On trouve par exemple dans la découpe des alliages cuivreux beaucoup de poinçons en carbure de tungstène généralement considérés comme plus résistants que les aciers. D'autres voies utilisent des revêtements de surface pour ce même objectif.

1.3.2.2. Mécanismes d'usure

Avant de présenter plus en détail les études sur l'usure des poinçons de découpage, il convient tout d'abord de rappeler les principaux modes d'usure observés sur les matériaux. Cette classification de l'usure est fondée sur le mécanisme à l'origine de son apparition. Cette classification généralement admise décompose l'usure des pièces frottantes selon quatre

mécanismes distincts dont les causes, et donc les paramètres influents, les remèdes et/ou le niveau de sévérité sont variés.

- ✎ Usure par adhésion : elle se manifeste par le transfert de matière de l'un des premiers corps sur le corps antagoniste et elle est susceptible d'aboutir dans sa forme la plus sévère au grippage. L'usure adhésive résulte de la formation de micro-jonctions entre les surfaces en contact et la création de micro-ruptures dans l'un des corps en contact,
- ✎ Usure par abrasion : elle est produite par des particules ou des aspérités dures. Celles-ci provoquent un déplacement et un enlèvement de matière, par déformation plastique et rupture par cisaillement, avec formation de micro-copeaux. L'usure abrasive se manifeste par la création de rayures, de griffures ou par un effet de polissage,
- ✎ Usure par fatigue : l'application sur les surfaces de contact de charges élevées cycliques est responsable d'un endommagement par fatigue mécanique superficielle, se traduisant par l'apparition de fissures en surface ou très proches de celle-ci, se propageant dans le volume donnant naissance au phénomène connu sous le nom d'écaillage,
- ✎ Usure par corrosion : un processus chimique, d'oxydation par exemple, couplé au frottement, est à l'origine de ce mécanisme d'endommagement.

Dans la plupart des cas, les outils de découpage montrent des signes d'usure abrasive dans la zone de contact. Selon Hambli [Hambli 2001-a] l'usure abrasive se produit le plus généralement dans l'outillage quand la surface de la tôle contient des particules dures, telles que les carbures ou les oxydes. Toutefois, on constate également des traces d'usure adhésive (cas des poinçons acier avec tôles acier) ainsi que des phénomènes d'écaillage.

Précisons également qu'un tribosystème est susceptible d'évoluer dans le temps et d'être le siège de plusieurs mécanismes d'usure successifs ou simultanés qui agissent alors de manière conjuguée, voire en synergie (exemple : usure adhésive et abrasive).

Comme on le voit, le contact poinçon/tôle est un système tribologique complexe où l'on peut être amené à constater au moins trois mécanismes d'usure.

1.3.2.3. Loi d'usure

L'usure est influencée par un nombre élevé de facteurs et son évaluation conduit souvent à des résultats dispersés. La comparaison des résultats obtenus avec différents systèmes est difficile de même que l'établissement de standards. La résolution des problèmes de frottement / usure ne repose que sur des lois générales, souvent empiriques. Selon Kapsa

[Kapsa 2001-a] les résultats d'expériences sont difficilement extrapolables d'une situation à une autre. Mais, la possession de lois d'usure aide à prédire le comportement et la durée de vie d'un système. Plusieurs de ces équations sont fondées sur l'hypothèse qu'une propriété conventionnelle des matériaux, le module de Young, E , ou la dureté, H , par exemple sera importante dans le processus d'usure.

La compréhension et la formalisation de l'usure par abrasion de surfaces en frottement a fait l'objet de nombreux travaux depuis une cinquantaine d'années. Archard ([Archard 1953], [Archard 1956]) en particulier a beaucoup travaillé sur l'usure non lubrifiée des métaux et a développé une loi d'usure applicable dans de nombreuses situations.

Archard a établi expérimentalement une relation (loi macroscopique d'usure) permettant d'estimer pour un contact pion / disque (disque en acier à outils très dur) (*figure 1.10*) le volume de matière usée dans le cas d'un contact glissant à vitesse constante et pour des matériaux de duretés très différentes. A partir de cela il a mesuré différentes usures de matériaux frottant à sec. Il a considéré l'usure d'un frotteur rugueux contre un plan rugueux, en adoptant l'hypothèse suivante : l'amplitude des rugosités ne varie pas pendant le processus, et que l'aire réelle de contact A_r reste toujours la même.

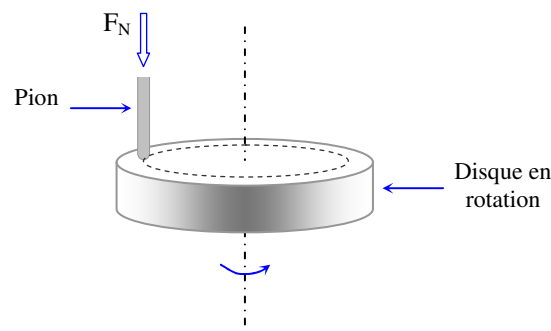


Figure 1. 10: Contact pion cylindrique / disque

La loi d'usure établie par Archard est :

$$V = K \times F \times s \quad (1. 3)$$

Avec :

V le volume usé (mm^3), K coefficient d'usure (mm^2/N), F la charge normale appliquée au contact (N) et s la distance parcourue (mm).

C'est la formulation classique de la loi d'Archard. Elle traduit la proportionnalité du volume d'usure avec la longueur de glissement et la force normale.

Le coefficient d'usure, K , varie lui-même avec les autres paramètres tribologiques comme la température, l'environnement, la nature des corps frottants, la vitesse de glissement et la charge normale. Sa valeur est aussi reliée à la nature de l'usure.

1.3.3. Quantification de l'usure des poinçons

Dans l'industrie du découpage l'usure des poinçons a des conséquences importantes sur la production. Une usure importante provoque une mauvaise géométrie sur les pièces découpées. D'un autre côté, l'arrêt des opérations de découpage, pour changer ou réaffûter les poinçons usés, est une contrainte supplémentaire qui pénalise la productivité. Selon Leroy [Leroy 1993] qui a étudié l'usure des outils de coupe, maîtriser l'usure sur les outils répond à un double souci :

- ↳ Quantitatif : réduire le coût des pièces produites.
- ↳ Qualitatif : obtenir des surfaces ayant des géométries optimales.

Pour atteindre ces objectifs il est nécessaire de pouvoir effectuer des mesures dans de bonnes conditions de précision et de reproductibilité. L'importance même de l'usure attendue va influencer le choix de la méthode de mesure. En effet, si l'usure est élevée, la détermination de la variation du volume ou de la masse sera un critère suffisant et facile à évaluer et le coût de la mesure peut être économique. Par contre, lorsqu'il est nécessaire de mesurer une usure faible, des techniques beaucoup plus précises et donc plus coûteuses sont indispensables.

En effet, comme cité par Felder [Felder 2006] l'usure des poinçons n'est mesurable avec les techniques métrologiques usuelles (rugosimétrie, profilométrie,...) qu'après perte d'une quantité notable de matière sur sa surface.

L'usure d'un poinçon peut avoir plusieurs origines et être influencée par de nombreux paramètres. Les variables opératoires influant sur l'usure sont nombreuses et les principales sont :

- ↳ Les caractéristiques du mouvement relatif ; cinématique, vitesse, amplitude...,
- ↳ L'effort normal appliqué,
- ↳ La rugosité des surfaces en contact (états des surfaces),
- ↳ L'environnement (atmosphère, température, lubrifiant...).

1.3.3.1. Relevé du rayon de l'arête coupante d'un poinçon usé

Nous allons présenter en premier la méthode employée par Hambli [Hambli 2001-a] et Maillard [Maillard 1991] pour qualifier l'usure des poinçons; il s'agit de la mesure du rayon de l'arête coupante du poinçon (*figure 11*).

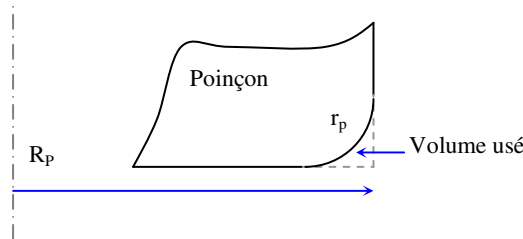


Figure 1. 11 : Géométrie de l'arête coupante du poinçon [Hambli 2003].

Ainsi, Hambli [Hambli 2001-a] affirme que l'influence de l'usure de l'outil sur le processus de découpe peut être modélisée d'une façon simplifiée en changeant la valeur du rayon, r_p , du bord de poinçon. Hatanaka et al. [Hatanaka 2003] ont présenté également l'évolution de l'usure du poinçon en fonction de l'évolution du rayon de son bord. Cette façon de faire est confrontée à l'impératif du démontage du poinçon afin d'accéder au rayon de son arête.

1.3.3.2. Mesure de l'usure par activation superficielle

Une des techniques les plus efficaces pour la mesure en continu des phénomènes d'usure est l'activation superficielle [Gréban 2006], utilisée notamment dans les domaines automobile et aéronautique. Elle permet de suivre et de quantifier en temps réel la cinétique de toute perte de matière. Elle consiste à marquer les composants en surface à l'aide d'un faisceau de particules issues d'un accélérateur puis à détecter le signal émis par les radio-isotopes créés lors de l'activation. Kapsa [Kapsa 2001-b], présente cette méthode comme une technique utilisée pour l'étude des débris ou particules d'usure. Cette technique, utilisant la radioactivité, peut être employée pour le suivi de systèmes lubrifiés. Le matériau à étudier est traité avec un élément radioactif avant d'être mis en place. Si la pièce s'use, des débris radioactifs se retrouvent dans l'huile et un compteur de particules sur des échantillons de lubrifiant contaminé permet alors d'étudier le phénomène d'usure de façon quantitative en suivant l'augmentation du comptage dans l'huile lié à la quantité de débris métalliques contenus dans celle-ci.

Mais cette façon de faire reste assez difficile à appliquer dans le découpage, vue la difficulté de récupérer le lubrifiant employé dans l'opération de découpe et les débris d'usure des poinçons.

Une manière originale d'utiliser cette méthode a été proposée par Gréban et al. [Gréban 2007] et Monteil et al. [Monteil 2008]. En effet, l'adaptation de cette méthode par Gréban a servi à étudier l'influence de quelques familles de paramètres de découpage sur l'usure. Cette adaptation à la mesure d'usure des poinçons de découpage consiste en premier lieu à activer la zone du poinçon en contact frottant avec la tôle, en se limitant aux arêtes de découpe pour plus de précision. L'activité émise par cette surface, qui dépend de la quantité de matière activée, est mesurable sans contact à l'aide d'une sonde de mesure des rayons γ émis par la pièce activée. Gréban a utilisé un système simple, à l'aide de rails placés sur la plaque matrice de l'outil, permettant le positionnement de la sonde de mesure au plus près du poinçon sans démontage. Par la suite, Gréban [Gréban 2007] a mesuré périodiquement le niveau d'activité résiduelle sur le poinçon. La diminution de l'activité par rapport à la mesure initiale à neuf permet de remonter au volume usé sur un poinçon. En effet, la perte d'activité est relative à la quantité de matière perdue par usure.

1.4. Qualité de la découpe

Si au moment du découpage, l'outillage (poinçon et matrice) subit des sollicitations cycliques, il en résulte une usure progressive des parties actives. Celle-ci induit des imperfections sur le bord découpé du produit fini (*figure 1.12*). Les défauts de fabrication peuvent être classés comme suit :

- ✧ Variations de cotes et modifications de la géométrie du bord découpé,
- ✧ Apparition de défauts de forme,
- ✧ Croissance de la hauteur de la bavure,
- ✧ Dégradation des caractéristiques mécaniques du matériau dans la zone affectée par la découpe.

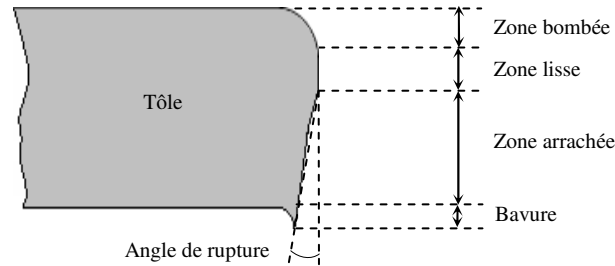


Figure 1. 12: Représentation et définition d'un profil type d'un bord découpé

1.4.1. Caractérisation d'une opération de découpage

Le processus de séparation du copeau de la bande découpée comprend plusieurs phases : déformation élastique, déformation plastique, endommagement et rupture. Il en résulte un profil de découpe non régulier dans l'épaisseur de la bande que l'on peut décrire de la façon suivante en partant de sa face supérieure :

- ↳ La partie bombée peut être reliée à la flexion de la tôle. Elle apparaît donc dans les phases élastique et plastique de la déformation. Plusieurs auteurs [Maillard 1991, Hambli 1996] affirment que la forme du profil, à ce niveau, s'explique par la flexion de la matière sous l'effet du couple engendré entre le poinçon et la matrice,
- ↳ La partie cisailée, consécutive aux déformations plastiques subies par la matière de la tôle,
- ↳ La partie arrachée et la bavure correspondent à la rupture de la matière. C'est l'amorçage et la propagation des fissures dans la tôle qui sont responsables de sa formation.

L'analyse du profil dans l'épaisseur d'une pièce découpée permet de définir les caractéristiques géométriques des pièces découpées. L'intérêt d'observer le profil d'une pièce découpée (*figure 1.12*) est donc de permettre une appréciation dans la détermination de la qualité du découpage. Les propriétés mécaniques et l'aspect géométrique du bord découpé sont plus particulièrement influencés par les paramètres qui gouvernent l'opération à savoir :

- ↳ Le jeu poinçon / matrice : L'aspect du bord découpé évolue quand le jeu varie, car la trajectoire de la fissure dépend fortement du jeu (cela postule l'existence d'un jeu optimal). Ce trajet de fissuration conditionne le profil du bord découpé [Tekiner 2006]. Hambli [Hambli 2004], partage également ce constat, et présente l'évolution du bord découpé en fonction du pourcentage du jeu relatif (*figure 1.13*).

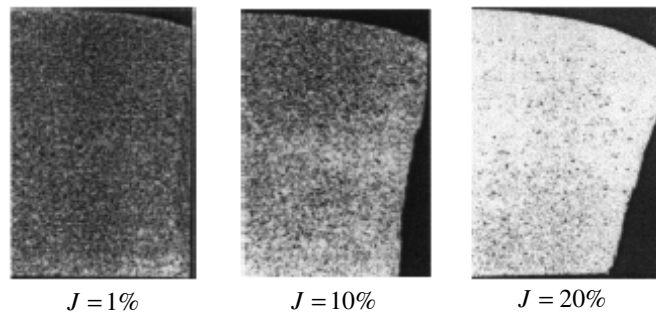


Figure 1. 13 : Influence du jeu relatif sur l'aspect du bord découpé [Hambli 2004]

Lorsque le jeu augmente l'on déduit que :

- La hauteur de la zone bombée augmente,
- La hauteur de la zone cisailée diminue,
- La hauteur de la zone arrachée augmente puis diminue pour des valeurs de jeu élevées (>20%).

Tekiner [Tekiner 2006] présente les mêmes résultats, en précisant également que la hauteur de la bavure augmente lorsque le jeu augmente. D'autre part, Goijaerts [Goijaerts 1999] a démontré que la diminution du jeu favorise la contrainte hydrostatique dans la tôle découpée. Pour des essais de traction, l'augmentation de la pression hydrostatique retarde la rupture et favorise la déformation plastique (striction). Par analogie, Goijaerts fait l'hypothèse que l'augmentation de la pression hydrostatique retarde l'apparition de cavités à l'origine de la rupture de la tôle, expliquant ainsi l'augmentation de la partie cisailée quand le jeu diminue.

✎ La nature du matériau : Le bord découpé change d'aspect en fonction du matériau utilisé ; plus le matériau est ductile plus la zone cisailée est grande et la bavure est importante. Cela est confirmé par Tekiner [Tekiner 2006] et Gréban [Gréban 2006].

Maillard [Maillard 1991] présente les travaux de Wong et Das qui décrivent deux cas extrêmes de l'influence de la nature du matériau sur le comportement lors de la découpe :

- Cas 1 : le matériau est parfaitement plastique et s'écoule de façon ductile dans le plan du mouvement de l'outil. La pièce découpée présente alors un bord uniquement cisailé.
- Cas 2 : le matériau est sensible à la fissuration ; l'apparition de fissures et leur propagation pendant la descente de l'outil provoquent la rupture souvent brutale de la pièce. La pièce présente dans ce cas uniquement une surface de rupture.

✧ La géométrie de l'outillage : Une relation de dépendance lie le faciès de rupture et la géométrie du bord tranchant de l'outillage. En étudiant l'impact du nombre de coups de presse sur l'usure des outils, Maillard [Maillard 1991] montre une relation quasi-linéaire entre le nombre de coups de presse effectués et la variation des rayons r_p et r_m . Ces résultats ont été utilisés par Hambli [Hambli 1996] pour quantifier l'influence de l'usure sur le profil découpé. Il montre, pour un jeu de 10% de l'épaisseur d'une tôle, une augmentation de 8% de la hauteur relative à la zone cisailée lorsque le rayon augmente de 0 à 0.2mm pour une épaisseur de tôle égale à 3.5mm. Par contre la hauteur relative à la zone arrachée diminue. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Noble et Oxley [Noble 1963].

✧ L'épaisseur des tôles : L'épaisseur de la tôle est un des facteurs les plus importants qui conditionnent la géométrie du bord découpé. Kals et al. [Kals 1998] montrent que les hauteurs des zones caractéristiques du bord découpé sont peu influencées par la diminution de l'épaisseur. En revanche, le trajet de la fissure et la taille de la bavure qui en résultent en sont très dépendants.

✧ La vitesse de découpe : Paramètre lié au procédé de découpage. L'augmentation de la vitesse de découpe du poinçon améliore la qualité du bord découpé. [Gréban 2006]

Comme cité plus haut Johnson et Slater [Johnson 1967] ont observé qu'une augmentation de la vitesse de découpe entraîne une augmentation de la partie cisailée dans le profil de découpe du cuivre Cuc1. De plus, Goijaerts [Goijaerts 1999] a observé une diminution de la partie cisailée pour des vitesses supérieures à 10 mm/s, dans le cas du découpage d'un acier X30Cr13. Ces résultats contradictoires confirment la conclusion de Balendra et Travis [Balendra 1970] qui précisent que l'influence de la vitesse de découpe sur le profil dépend des caractéristiques des matériaux découpés. Stegman et al. [Stegeman 1999] et plus récemment Meunier [Meunier 2005] montrent que l'effort maximal de découpage chute lorsque la vitesse du poinçon augmente. La pénétration à rupture totale augmente également, ce qui se traduit par une hauteur de la zone cisailée plus importante. En effet, la vitesse importante du poinçon force le matériau à se déformer plus rapidement. Cette variation rapide de déformation plastique conduit à une dissipation thermique plus importante et donc à une augmentation de la température. Il est bien connu que la hausse de la température provoque un adoucissement du matériau.

1.4.2. Bavure de découpe

La bavure est une conséquence de la fissuration qui se produit lors de la phase de la déformation. Cette fissure se produit près du bord du côté du poinçon et de la matrice [Hatanaka 2003]. Taupin [Taupin 1996] et Touache [Touache 2006] affirment eux que la bavure résulte de la formation de la tombée de découpe (zone bombée) dans la phase élastique et en phase d'initiation de fissures macroscopiques.

La taille de bavures évolue selon le jeu, l'état d'abrasion du bord d'outil et les propriétés du matériau découpé [Hatanaka 2003]. Notamment, la composition des alliages découpés a une influence notable sur la quantité de bavures qui s'est accumulée sur un bord découpé pendant l'opération de découpe [Gréban 2007]. Gréban [Gréban 2007], qui a étudié le découpage des alliages cuivreux, a montré que le niveau de bavure résultant de la découpe est conditionné par la microstructure et, en particulier, par les précipités présents dans la matrice de cuivre. Plus grand est le nombre de précipités, plus faible est la quantité de bavure. Par ailleurs en mesurant la hauteur et la largeur de la bavure, Gréban [Gréban 2006] note qu'en général un jeu plus faible diminue celle-ci (*figure 1.14*).

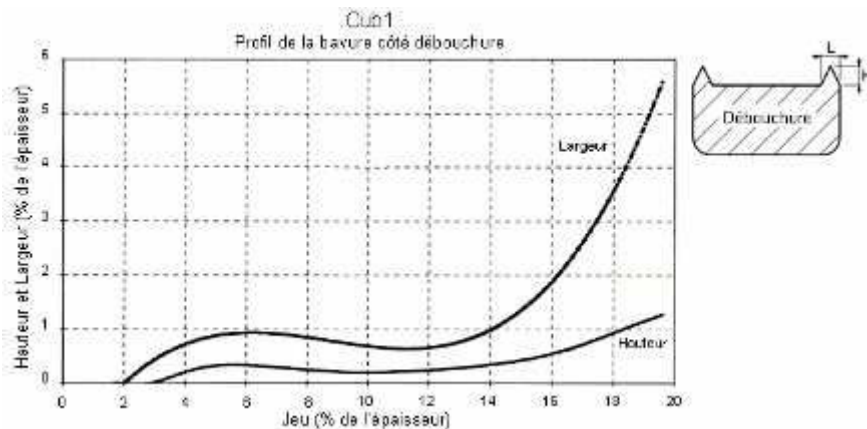


Figure 1. 14 : Influence du jeu poinçon/matrice sur la bavure de découpe [Gréban 2006]

Pour évaluer l'influence de l'état d'écrouissage des tôles découpées, Gréban [Gréban 2006] a comparé trois alliages de cuivre (CuFe0.1P0.03) avec des états d'écrouissages différents. Il a remarqué que la quantité de bavure formée pendant la découpe est identique. Ce résultat semble démontrer l'indépendance de la quantité de bavure en fonction de l'état d'écrouissage de la tôle découpée.

Trapied [Trapied 1981] résume assez bien les facteurs influençant l'apparition de la bavure sur le bord découpé :

- ↳ L'état d'érouissage : Les métaux érouis se découpent mieux que les métaux recuits qui tendent à laisser des bavures et des bourrelets et nécessitent des jeux plus réduits,
- ↳ La présence de particules dures (carbures, composés à base de fer, alumine, etc., ...) : celles-ci usent prématurément les outillages, conduisant à un niveau de bavure plus élevé,
- ↳ L'entraînement des couches superficielles s'amorçant entre le poinçon et la tôle : la présence d'oxydes abrasifs provoque également une usure prématurée de l'outillage, donc une apparition consécutive de la bavure.

1.4.2.1. Bavure écrasée

Dans le cas du découpage progressif la géométrie complexe des pièces est obtenue en plusieurs coups de presse. Comme vu au paragraphe 2.3, les pièces sont découpées en plusieurs coups, ainsi la bavure formée au $N^{ième}$ coup de presse est écrasée par l'application du dévêtisseur au coup $N+1$ (figure 1.15), on parle alors de bavure écrasée (figure 1.16).

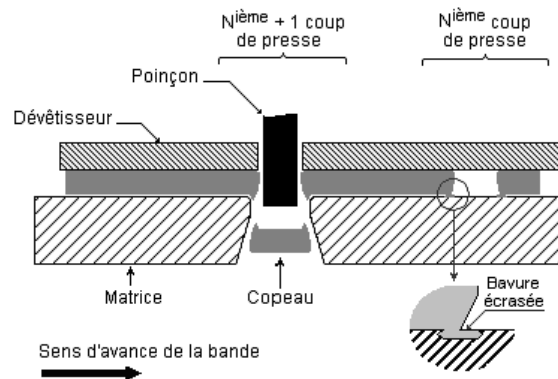


Figure 1. 15: Représentation de l'écrasement de la bavure en découpage progressif

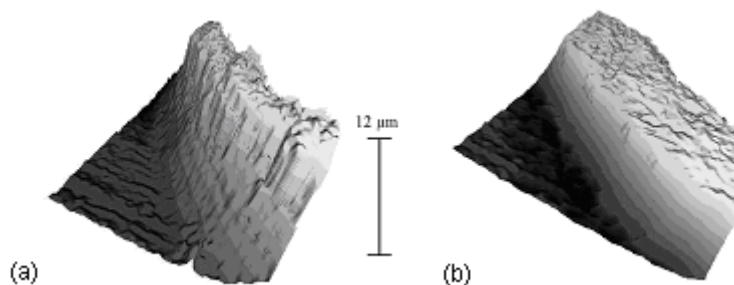


Figure 1. 16: Écrasement de la bavure. [Gréban 2006]

(a) Bavures après un coup de presse.

(b) Bavures dans un outil progressif.

Ce type de procédé de découpage va bien évidemment rendre plus complexe la mesure du niveau de la bavure.

1.4.2.2. Mesure de la bavure de découpe

Traditionnellement, le profil d'un bord découpé est mesuré à partir d'une coupe perpendiculaire sur la pièce découpée. Hambli [Hambli 2003] utilise cette méthode et propose une quantification de la hauteur de bavure avec une mesure en utilisant la microscopie optique en un point du bord découpé. Cette méthode est basée sur une coupe précise des échantillons enrobés. Par la suite, les pièces sont polies avec soin de telle sorte que la bavure ne soit pas endommagée. Enfin, la taille de la bavure est mesurée au moyen d'une micrographie de la surface polie. Cependant, Hambli a souligné la difficulté de mesurer avec précision la quantité de bavure sur un bord découpé. Cette méthode semble également avoir été utilisée par Li [Li 2000] ainsi que Husson et al [Husson 2005].

Dans d'autres travaux les auteurs ont utilisé une méthode basée sur le principe de la déduction d'une image de la bavure découpée sur un projecteur de profil. Hernandez [Hernandez 2006] a déduit l'épaisseur de la tôle et la hauteur de bavure de quatre profils le long de la forme découpée. Cette mesure a été confirmée par des observations au MEB (microscope électronique à balayage) du bord découpé mais sur un seul essai.

De son côté Grünbaum [Grünbaum 1996] propose tout d'abord une définition de la hauteur de bavure. En raison de la présence d'une déformation résiduelle macroscopique lors de l'opération de découpage, la hauteur de bavure (*figure 1.17*) est définie comme « la différence entre le point le plus élevé de la bavure et la surface de la tôle à proximité immédiate de la bavure ».

Cette définition semble être satisfaisante et sera utilisée dans la suite de ce travail.

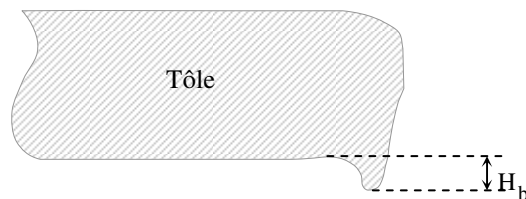


Figure 1. 17: Définition de la hauteur de la bavure

L'auteur propose également un inventaire des méthodes optiques fondées sur l'observation du profil de la pièce découpée ou des méthodes basées sur un principe de comparateur entre une pointe posée sur la tôle adjacente à la bavure et un micromètre. Dans ce dernier cas, l'approche du comparateur ferme un circuit électrique limitant ainsi l'effort sur

la bavure et donc sa déformation. On mesure alors la hauteur de bavure via le déplacement du comparateur jusqu'au contact électrique. Toutefois, cette mesure, qui a l'avantage de ne pas nécessiter de préparation et de découpe des pièces, ne se fait de nouveau qu'en quelques rares points du contour.

D'autres types de méthodes ont été proposés pour la métrologie des hauteurs de bavure. On peut citer la profilométrie optique sans contact ou tactile (*figure 1.18*) [Gréban 2006], ou encore la métrologie par vision [Levy 2000] du bord découpé utilisant l'ombre de la bavure (*figure 1.19*), et qui s'adresse à des pièces présentant un faciès rectiligne. Cette dernière mesure permet alors d'accéder au profil des hauteurs de bavure sur une longueur de bord découpé de 4mm.

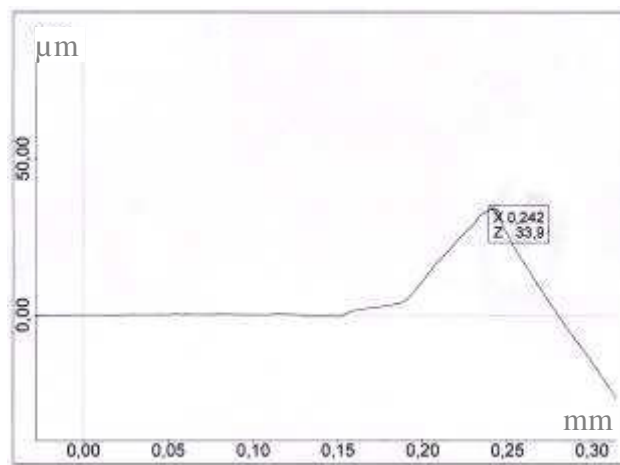


Figure 1. 18 : Mesure de la bavure par profilométrie tactile [Gréban 2006]

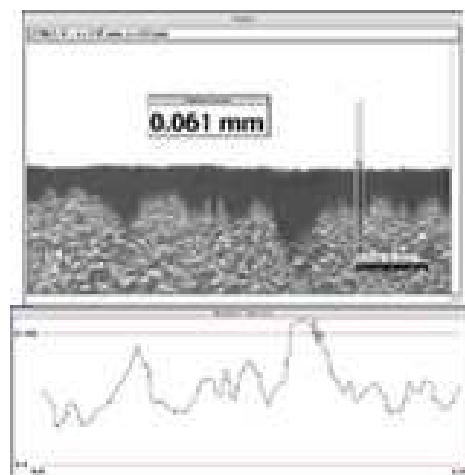


Figure 1. 19: Mesure optique de la bavure de découpe : ombre de la bavure [Gréban 2006]

D'autre part, Shin [Shin 2005] a étudié le mécanisme de formation de la bavure en vue de réduire sa quantité, et cela en réalisant des mesures par une méthode basée sur un laser en

réflexion qui est très proche des mesures avec un capteur laser à triangulation. La principale limitation de cette méthode originale est que la taille du spot est supérieure à 50 micromètres. Toutefois, comme la bavure est généralement plus petite, cette méthode ne peut être appliquée pour le découpage des tôles minces. Une méthode très similaire a été décrite par Toshihiro [Toshihiro 1989] pour les bavures résultant du moulage.

D'autres méthodes de mesure de la bavure sont citées dans la littérature, mais se rapportent à des bavures produites lors du perçage. Par exemple Nakao [Nakao 2006], a mis au point un système de mesure basé sur une technique de traitement d'image. Cette méthode lui a également permis d'étudier l'irrégularité de la présence de bavures car il utilise quatre images capturées dans le profil l'autorisant à décrire le bord de bavure. La principale limitation de cette méthode est que la hauteur de la bavure reste inconnue.

Un résumé intéressant de méthodes de mesures des bavures formées lors des processus d'usinage a été proposé par Ko [Ko 2006]. Cet article se concentre principalement sur les bavures de perçage. Il montre qu'il existe de nombreuses méthodes possibles pour la mesure, celles avec contact et d'autres sans contact. Comme les bavures sont fragiles seules les méthodes sans contact sont décrites. Trois méthodes sont comparées: la première, déjà citée plus haut, utilise la triangulation, mais avec une taille de spot de 30 micromètres, la méthode à interférométrie, et enfin la méthode conoscopique à holographie laser. L'Interférométrie ne peut pas être utilisée pour le découpage de tôles minces car la bavure est très petite et comporte des arêtes vives. La dernière méthode peut être un bon moyen d'évaluer le volume des bavures car elle mesure la hauteur et la largeur de la bavure. La taille du spot est de moins de 8µm et peut donc être utilisée en découpage. L'utilisation d'une table motorisée en X et Y permet une cartographie complète de la bavure, et permet ainsi le calcul du volume total des bavures. Le principal handicap de cette dernière méthode est qu'elle peut être très coûteuse en temps. Enfin, une autre enquête sur les méthodes existantes a été publiée par Laroux [Laroux 1998]. Des méthodes tactiles, visuelles et optiques sont discutées. Toutes les méthodes décrites précédemment sont énumérées. La méthode laser confocal est citée par Ko [Ko 2006] comme étant suffisante pour les micros-bavures.

Dans le cas de l'écrasement de la bavure sur un outil progressif, Gréban [Gréban 2006] précise que la bavure ne peut pas être mesurée par sa hauteur et sa largeur, comme c'est traditionnellement le cas. Il a employé une technique particulière pour la mesure de la bavure écrasée. Cette technique est basée sur le relevé de la surface écrasée de la bavure. Elle a été employée après les constatations suivantes : sur des relevés par profilométrie optique de la bavure de découpe avant et après son écrasement par le dévêtisseur (*figure 1.20*), Gréban a

remarqué que la bavure de découpe passe d'une hauteur de 24 à 8 μm du fait de son écrasement par le dévêtitseur. Le volume de bavure est de 546 000 μm^3 avant son écrasement et de 591 000 μm^3 après l'application du dévêtitseur. Les deux volumes ont été considérés équivalents compte tenu de l'incertitude de mesure importante ($\pm 15\%$).

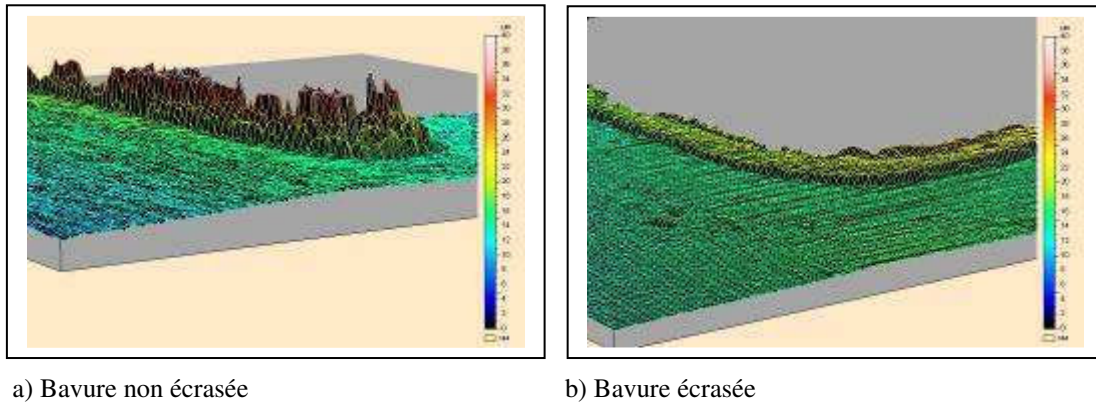


Figure 1. 20 : Profilométrie optique de la bavure écrasée et non écrasée [Gréban 2006]

Pour ces mesures, Gréban a utilisé des photographies MEB des pièces posées à plat, bavure vers le haut, et un logiciel de traitement d'image (*Sigmascan®*). Le contour de la surface de bavure écrasée est délimité point par point, permettant au logiciel de calculer la surface correspondante.

Cette approche fait suite à l'utilisation d'une technique proche de l'ombroscopie qui avait permis de suivre l'évolution de l'accroissement de la quantité de bavure sans toutefois en permettre la quantification. Il s'agit de mesurer l'évolution de la surface éclairée au travers de la forme découpée. L'apparition et l'augmentation de la bavure écrasée engendrent une augmentation de la surface ombrée (*figure 1.21*). Sur cette figure, D représente le diamètre du trou découpé sans la bavure et d est le diamètre dans le cas de présence de bavure.

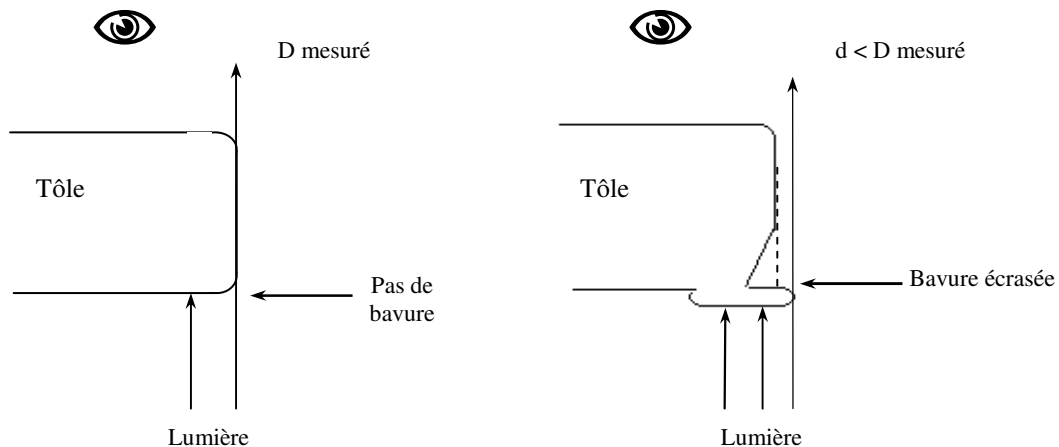


Figure 1. 21 : Mesure de la surface de bavure par « ombroscopie »

Dans ce dernier cas, la quantité de bavure est appréhendée via une surface. Cette mesure permet de suivre une évolution relative de la bavure mais ne suffit pas pour l'évaluation quantitative requise pour être corrélée, par exemple, à un modèle théorique. L'écrasement de la bavure rend donc sa caractérisation, avec les moyens traditionnels, peu fiable.

1.4.3. La relation entre l'usure et la qualité géométrique du bord découpé

Comme vu plus haut l'usure cause des arrondis sur les bords des outils. Ceci réduit l'acuité des poinçons pendant le cisaillement des tôles, et augmente la déformation des tôles. Ce qui est mis en évidence par les études bibliographiques concernant la relation entre l'usure et la qualité de découpe se résume dans le constat : plus l'outil sera usé plus la bavure sur le produit sera importante. D'ailleurs, les bavures des pièces deviennent plus grandes et la pénétration du poinçon correspondant au déclenchement de fissures dans la tôle augmente.

Hambli [Hambli 1996] affirme que du point de vue industriel, la connaissance d'un critère reliant l'usure et la qualité géométrique du bord découpé, serait une donnée très utile permettant de changer l'outillage au bon moment en vue d'obtenir une qualité déterminée sur un bord découpé. Par la suite, l'auteur détermine un paramètre de nature géométrique ne dépendant que de l'outillage pour caractériser son état d'usure. Ainsi, il suppose que l'état de l'usure de l'outillage est caractérisé par le rayon de courbure, r_P , de son bord tranchant (*figure 1.22*).

Par ailleurs, Husson [Husson 2005] et Gréban [Gréban 2006] montrent également qu'une usure progressive des parties actives crée un rayon de courbure des outils de découpe (poinçon et matrice). Ce rayon est en augmentation avec le nombre de coups de presse. Cette modification de la géométrie des outils se traduit principalement par une augmentation de la bavure et de la partie cisailée du bord découpé.

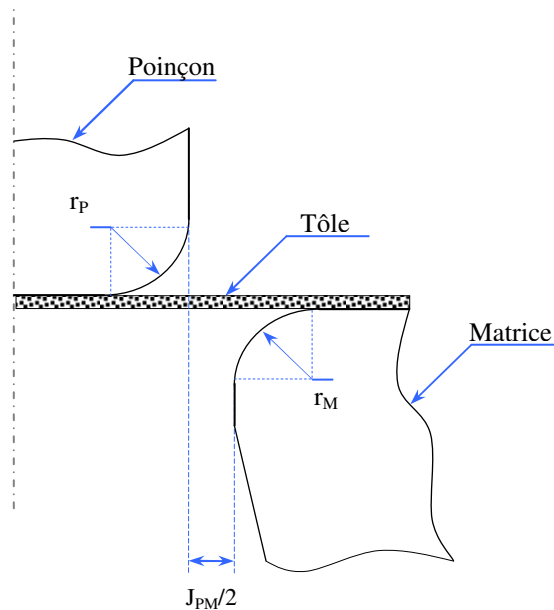


Figure 1. 22: Géométrie du bord tranchant du poinçon et de la matrice

1.5. Simulation numérique du procédé de découpage

La simulation numérique des procédés de mise en forme s'intègre de plus en plus dans les activités de conception des produits. Le découpage n'échappe pas à cette tendance. Les modélisations numériques de la mise en forme par découpage ont eu généralement pour principaux objectifs la prédiction du comportement des matériaux en découpage à l'aide de modèles analytiques et l'étude paramétrique du procédé.

Nous allons présenter ici les principaux résultats issus des différentes modélisations de l'opération citées dans la bibliographie, et plus particulièrement ceux qui concernent la prédiction de l'usure des outils et la qualité des pièces après découpage.

1.5.1. Aspects abordés par la simulation numérique du découpage

La simulation numérique du procédé de découpage a fait l'objet de nombreux travaux de recherche. Les difficultés rencontrées lors d'une telle simulation sont principalement liées au modèle de comportement du matériau et à l'adaptation du maillage. En effet, à la différence d'autres procédés, la simulation du découpage nécessite le suivi des déformations du matériau jusqu'à la rupture totale d'une tôle. A ce titre, la prise en compte de l'endommagement du matériau lors du découpage a été abondamment abordée dans la

littérature [Brokken 1998], [Brokken 2000], [Goijaerts 2000], [Hambli 2001-a]. D'autre part, malgré les difficultés aussi bien sur le plan physique que sur le plan numérique, Hallquist et al. [Hallquist 1985] précisent que la modélisation du contact avec frottement est un point clé dans le domaine de la simulation des procédés de mise en forme.

1.5.1.1. Aspect numérique

L'étude d'un problème par la méthode des éléments finis nécessite en premier lieu un maillage soigneusement réalisé. La sensibilité des résultats numériques dépend grandement de cette étape primordiale. Au cours du processus du découpage des tôles minces il se produit des déformations dans une zone localisée dans une petite bande de matière de la tôle découpée. Ainsi, un maillage adéquat de cette zone est nécessaire. Maillard [Maillard 1991] a testé plusieurs maillages pour aboutir à un compromis précision/temps de calcul. Il présente donc un maillage anisotrope avec localisation des éléments de petite taille dans les zones au voisinage des arêtes du poinçon et de la matrice.

Cependant, étant données les distorsions que subissent les éléments du maillage situés dans la zone de cisaillement de la tôle découpée, le maillage déformé ne permet plus le respect des conditions de contact lors de la pénétration du poinçon dans la tôle. Ces distorsions dans le maillage peuvent conduire à des solutions très approximatives voire erronées.

La solution proposée par Lemiale [Lemiale 2004] pour remédier aux problèmes liés à la distorsion des éléments du maillage d'une tôle en découpage est le remaillage. Pour l'auteur cela permet un meilleur résultat suite à la simulation du découpage et notamment en termes d'évolution de l'effort de découpe en fonction du déplacement. Par ailleurs, Hambli [Hambli 1996], utilise la rupture des éléments distordus dans le maillage pour s'affranchir de la question du remaillage. Au cours de la pénétration du poinçon un élément distordu sera rompu ce qui constituera la fissure de la tôle.

Rachik et al. [Rachik 2002] et Brokken [Brokken 1999] ont adopté quant à eux une formulation arbitraire lagrangienne eulérienne (ALE) pour diminuer l'influence du maillage sur le résultat du calcul. Ces mêmes auteurs ont présenté un cas de remaillage total de la structure et un remaillage par la méthode de relocalisation des nœuds.

Leung et al. [Leung 2004] insistent sur le fait qu'au-delà de 30% de l'épaisseur de pénétration du poinçon, la mesure des déformations sans remaillage n'est pas fiable. Il semble certain que le remaillage est une solution indispensable pour éviter les problèmes numériques

de distorsion des éléments, mais cette opération est inévitablement accompagnée par une étape de transport des champs de données afin de permettre le calcul des variables des incréments successifs.

1.5.1.2. Comportement mécanique

Nous avons vu plus haut que la découpe d'une tôle passe par plusieurs étapes, de la déformation initiale de la surface de la tôle jusque à la rupture totale et la séparation de la matière en deux parties. Une modélisation de l'opération de découpage doit décrire ces étapes pour simuler le comportement réel de la matière.

Maillard [Maillard 1991] cite les travaux de Wong et Das, en 1975, qui présentent une des premières applications de la méthode des éléments finis au découpage, ils ont utilisé un modèle 2D élasto-plastique en petites déformations, cela a permis d'atteindre l'objectif de prédire les premières phases de la découpe. Leurs résultats sur l'effort maximal de découpage permettent d'approcher les mesures expérimentales assez correctement pour les matériaux testés. Taupin et al. [Taupin 1996] considèrent également un comportement élasto-plastique avec une formulation en grandes déformations. Ce modèle leur a permis de simuler toutes les phases du procédé. Cette approche semble avoir été employée également par d'autres auteurs ([Brokken 1999], [Faura 1998], [Goijaerts 2001], [Kwak 2002], [Hatanaka 2003] et [Hambli 2002-a] pour l'étude du comportement des tôles en découpage. D'autre part, et plus récemment, Husson [Husson 2005] a implémenté des modèles pour la prise en compte de la taille des grains de la matière découpée pour mieux prédire le comportement en découpage de tôles de faible épaisseur.

Par ailleurs, d'autres auteurs ont intégré les effets de la vitesse et de la température à leurs modélisations [Ko 1997], [Touche 2006]. Lemiale [Lemiale 2004] a utilisé quant à lui une loi thermo-élasto-visco-plastique de type multiplicative pour modéliser le découpage d'alliage cuivreux.

Cependant, au cours de la découpe, et après la phase de déformation, il se produit une fissuration dans la matière de la tôle initiée au niveau des arêtes de découpe du poinçon et de la matrice. La prise en compte de l'endommagement dans les lois de comportement est relativement complexe à mettre en place. A cet effet le modèle de Gurson, qui est un modèle d'endommagement qui repose sur l'analyse de l'évolution des microcavités par nucléation, croissance et coalescence, a été utilisé par plusieurs auteurs [Hambli 1996], [Yoshida 2001], [Post1996], [Rachik 2002], [Klingenberg 2003], [Homsy 1996], [Husson 2005], [Hambli

2001-b)]. Ces auteurs s'appuient sur des données expérimentales pour montrer que leur modèle permet une bonne prédiction de la courbe d'effort. Cependant, Hambli [Hambli 2001-b] montre que le modèle de Gurson couplé à un modèle de comportement élasto-plastique ne permet pas d'obtenir des résultats réalistes, contrairement au modèle de Lemaitre qui permet d'obtenir des résultats plus réalistes. Ce modèle permet la localisation de l'endommagement maximal suivant la bande de cisaillement. Sur *la figure 1.23*, Hambli [Hambli 2001-b] montre que la courbe effort-déplacement obtenue par le modèle de Lemaitre est en meilleur accord avec la courbe expérimentale en comparaison avec que celle prédite par le modèle de Gurson. Sur la même figure on constate également l'intérêt de la prise en compte de l'endommagement dans le modèle numérique.

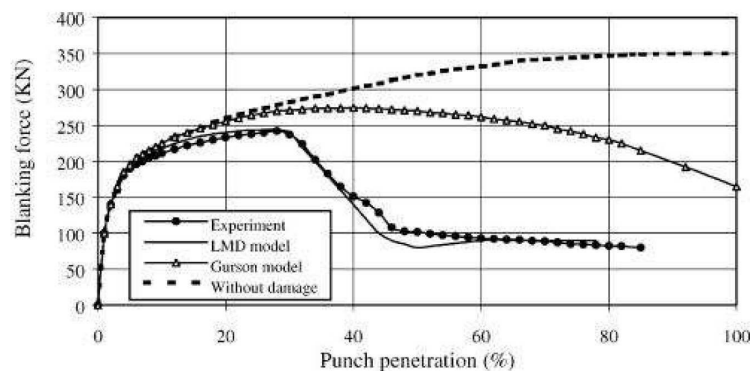


Figure 1. 23 : courbes effort/déplacement numériques avec la courbe expérimentale [Hambli 2001-b]

D'autre part, la simulation de la rupture de la tôle découpée nécessite de prédire la trajectoire de propagation d'une ou plusieurs fissures. Touache [Touache 2006] précise qu'il existe principalement deux grandes familles de critères d'amorce de fissures. D'une part, les critères reposant sur l'analyse de l'évolution des microcavités, et d'autre part les critères de nature empirique. Hambli [Hambli 1996] et Lemiale [Lemiale 2004] présentent un recueil de différents critères permettant l'amorce de fissures. Cependant, la définition d'un critère adapté au découpage des tôles sera plus pertinente. Ainsi, Goijaerts [Goijaerts 1999] a étudié quatre critères : le critère de Freudenthal, le critère Cockroft-Latham, le critère de Rice et Tracey et enfin le critère d'Oyane. La valeur critique de chaque critère est donnée connaissant la pénétration à rupture pour un jeu poinçon/matrice donné. La validité du critère est vérifiée en faisant varier le jeu et en comparant les simulations numériques avec les données des essais sur presse. Goijaerts propose une modification des critères de Rice et Tracey et de Oyane. Il montre que ces deux critères modifiés sont capables de prédire la pénétration à rupture pour plusieurs valeurs du jeu poinçon/matrice. Hambli [Hambli 1996] affirme également d'après une étude comparative des différents critères que le critère de Rice et Tracey est le plus adapté

pour le problème du découpage, il propose également une amélioration de ce critère. L'auteur note également que pour modéliser la propagation d'une fissure, certains auteurs utilisent la technique d'annulation de raideur des éléments (donc l'énergie de déformation) pour lesquels une valeur critique de l'endommagement est atteinte. Touache [Touache 2006] cite une autre technique assez proche de celle-ci, qui consiste à réactualiser le maillage lorsqu'un élément atteint la valeur seuil d'endommagement. Cette réactualisation s'effectue par suppression de l'élément concerné. Les codes commerciaux de simulation numérique sont largement basés sur ces deux techniques.

Toutefois, pour ces méthodes la direction et la forme de la fissure sont très dépendantes du maillage initial de la tôle à découper. La finesse du maillage va influencer la précision des résultats. En outre, Brokken [Brokken 1999] définit un potentiel d'endommagement permettant de calculer la direction d'une fissure et sa longueur d'avance lors de la découpe. Ainsi, l'angle et la longueur d'avance de la fissure permettent de reconstruire la géométrie externe de la tôle découpée. Par la suite, la nouvelle géométrie est maillée, et les variables mécaniques nécessaires à la poursuite du calcul sont transportées sur le nouveau maillage par des techniques d'interpolation.

Söderberg [Söderberg 2006] présente également une modélisation numérique du procédé de découpage sous le code commercial *ABAQUS®/Explicit*. Un critère de fissuration est adjoint pour estimer le départ et la propagation de la fissure. Il s'agit du modèle de fissuration en cisaillement d'*ABAQUS®* (*shear failure model*). Il est basé sur une valeur équivalente de déformation plastique aux points d'intégration et la fissuration est considérée se produire quand le paramètre de détérioration dépasse 1.

$$\omega = \frac{\varepsilon_0^{pl} + \sum \Delta \varepsilon^{pl}}{\varepsilon_f^{pl}} \quad (1.4)$$

Avec

ε_0^{pl} : Valeur initiale de la déformation plastique équivalente

$\Delta \varepsilon^{pl}$: Incrément de déformation plastique

ε_f^{pl} : Déformation à la rupture (3.5 pour les deux premiers matériaux, 3 pour les autres)

Nous allons présenter par la suite les principaux résultats numériques liés à l'état d'usure des poinçons et la qualité des bords découpés.

1.5.2. Simulation de l'usure des outils

Le suivi de l'état d'usure d'un poinçon lors d'une simulation numérique du procédé de découpage permettrait de prédire sa durée de vie, afin de prévoir son remplacement ou son affûtage.

Hambli [Hambli 2001-c] présente un modèle de prévision de l'usure des outils de découpe qui a été mis en application dans un code d'éléments finis dans lequel l'usure d'un outil est une fonction de la pression normale et de quelques paramètres matériaux. Ainsi, l'auteur suit l'évolution de l'usure du poinçon, représentée par l'évolution du rayon de son arête coupante, en fonction du nombre de cycles de découpe. Touache [Touache 2006] a étudié pour sa part numériquement l'influence des rayons des arêtes coupantes du poinçon et de la matrice sur la découpe. Ce paramètre joue un rôle extrêmement important dans le découpage de tôles minces car il représente un indicateur de l'état d'usure des outils. Après avoir fait varier simultanément les rayons r_p et r_m (rayon de l'arête du poinçon et de la matrice) entre deux valeurs réalistes Touache constate qu'une valeur faible des rayons r_p et r_m conduit à une augmentation de la déformation équivalente maximale, une augmentation de la température maximale et une augmentation de la vitesse de déformation maximale. Par la suite, l'analyse des courbes effort/déplacement montre que l'effort maximal de découpage diminue de 8.8% lorsque les rayons r_p et r_m passent d'une valeur de 0.03mm à 0.01mm. La *figure 1.24* illustre ce résultat. L'auteur note également que la position de l'effort maximal par rapport à la pénétration du poinçon passe de 14.5% à 30% de l'épaisseur lorsque les rayons r_p et r_m augmentent.

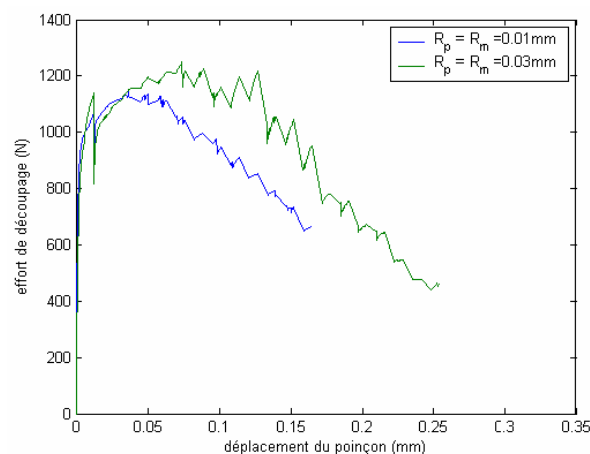


Figure 1. 24 : Courbes effort/déplacement pour deux valeurs des rayons r_p et r_m [Touache 2006]

1.5.3. Prédiction numérique de l'aspect d'un bord découpé

Comme indiqué plus haut un bord découpé est composé généralement de quatre zones caractéristiques de sa géométrie. Ces zones, qui sont liées aux différentes phases de la découpe, sont la zone bombée (ou tombée), la zone cisailée, la zone arrachée, et la zone de bavure. Nous allons présenter ici quelques études visant la prédiction de la géométrie d'un bord découpé.

Ko et al. [Ko 1997] montrent que pour une configuration géométrique donnée, la forme de la tombée est fonction de la vitesse de découpe. Ils montrent également un échauffement local, dans la zone de cisaillement, allant jusqu'à 786°C.

Hambli [Hambli 2003] présente le code *BLANKSOFT* qui est dédié à l'optimisation du procédé de découpage des tôles. Le code développé tient compte de l'analyse des effets d'usure de l'outil sur la géométrie du bord cisailé comprenant la formation de bavures aussi bien que la force de découpe et l'état de durcissement du bord découpé. Ce code permet donc la prédiction de la géométrie du profil découpé, l'état mécanique de la zone cisailée, la hauteur de la bavure, et la courbe force/pénétration. Le modèle de découpe utilisé par l'auteur pour le développement du code *BLANKSOFT* est basé sur la description du mécanisme de déformation pendant le processus de cisaillement. En outre, Hambli [Hambli 2002-b] présente également la combinaison de l'approche prédictive par éléments finis avec la modélisation par réseau de neurones en se basant sur les principaux paramètres du découpage afin de prévoir la taille de bavures sur les pièces découpées. Les réseaux sont utilisés en tant que dispositifs numériques pour substituer le code d'éléments finis requis à la prévision de la taille des bavures. Pour cela l'auteur utilise pour les réseaux de neurones l'état d'usure de l'outil et le jeu poinçon/ matrice comme données d'entrée. Le modèle de réseau de neurones a été formé en employant les résultats numériques issus de la simulation par éléments finis. L'avantage principal de l'utilisation des réseaux neuronaux est que le modèle peut estimer la taille de bavures très rapidement et exactement.

D'autre part, Fang et Zeng [Fang 2002] mettent en évidence l'influence du jeu poinçon/matrice sur le profil découpé en introduisant un comportement thermo-élasto-viscoplastique. Husson [Husson 2005] présente une étude du comportement et la rupture d'un alliage de cuivre au cours d'une opération de découpe. Cela est réalisé avec deux approches ; une approche mécanique et une autre phénoménologique. Et cela en vue d'étudier l'influence des paramètres procédés sur la qualité de découpe. Les deux modèles prennent en compte les effets de vitesses de déformation et de température, sur le comportement plastique et sur

l'endommagement et cela sur une grande plage de vitesse de déformation. Par ailleurs, l'auteur présente une étude numérique de l'influence de ces paramètres sur l'aspect du profil de découpe. Sur la *figure 1.25* Husson montre l'influence de l'usure du poinçon et de la matrice (caractérisés par leurs rayons de courbure des bords tranchants) et du jeu sur le profil de rupture. Il apparaît que l'usure favorise l'apparition de la bavure et que l'augmentation du jeu de découpe provoque une augmentation de l'angle de rupture et de la zone cisailée.

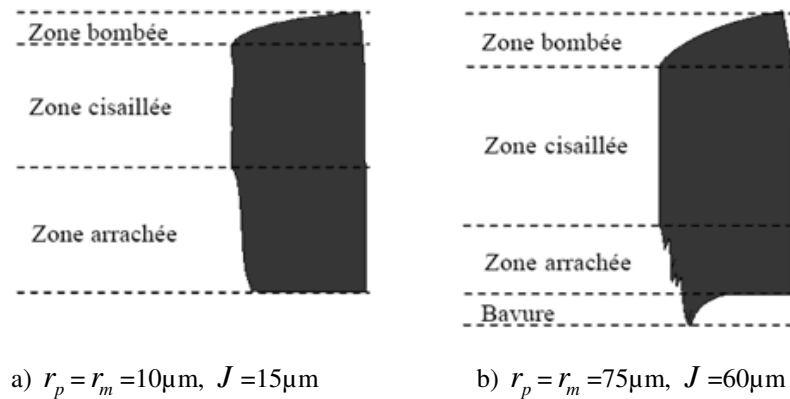


Figure 1. 25 : Influence des rayons de courbure et du jeu sur le profil découpé. Bord découpé obtenu numériquement [Husson 2005].

1.6. Conclusion

Ce chapitre présente une description non exhaustive des travaux bibliographiques liés au découpage mécanique et aux phénomènes caractérisant cette opération de mise en forme.

Il se dégage des études expérimentales que la caractérisation du processus de découpe se fait principalement par la courbe effort/déplacement identifiée lors d'un cycle de la presse de découpe, et par le profil dans l'épaisseur de la tôle découpée. Ces deux éléments sont liés à la nature du matériau découpé et aux différents paramètres liés au process. La qualité de découpage des tôles peut être vérifiée en mesurant l'importance relative des zones bombée, cisailée, arrachée et la taille de bavure. La qualité est meilleure quand la zone cisailée est importante sur le bord découpé, parce qu'elle respecte la géométrie désirée sur les pièces découpées.

Concernant la bavure de découpe, la littérature nous montre qu'il existe de nombreuses méthodes de mesure, principalement fondées sur un prélèvement destructif de la pièce découpée et donc de la métrologie en quelques rares positions du bord découpé. Il convient de noter qu'aucun des auteurs cités ne mentionne le degré d'homogénéité de la bavure le long du

bord découpé. En fait, les mesures présentées sont obtenues, au mieux, par quatre images distinctes du bord découpé, mais plus généralement sur un seul profil. Seul Hogman [Hogman 2002] présente une métrologie sur huit points sur le contour de découpe. Les difficultés rencontrées dans la mesure de la hauteur de la bavure, par les moyens traditionnels, peuvent également être accrues lors de l'examen de la formation de la bavure au cours d'un processus industriel avec un outil progressif. En effet, celle-ci, formée lors d'une découpe, se trouve écrasée sur la matrice par le serre-flan lors de l'opération de découpe suivante. Partant de ce fait, il est nécessaire de construire une méthode de quantification qui s'affranchisse des difficultés de mesures. En ceci en prenant en compte l'état de la bavure et sa distribution sur un bord découpé.

L'usure des poinçons de découpe est un aspect très important dans la maîtrise du découpage. Habituellement, l'usure est mesurée après démontage du poinçon en effectuant un relevé du rayon de l'arête de découpe. Cette façon de faire n'est pas adaptée pour un suivi de l'évolution de l'usure des poinçons tout au long de la découpe. En revanche, la technique de l'activation superficielle le permet, grâce à la mesure in situ de l'usure. Les mesures issues de cette méthode combinées éventuellement à des mesures de la quantité de bavure produite sur les pièces découpées permettraient une corrélation de ces deux phénomènes afin de maîtriser la qualité des produits découpés.

Enfin, un important travail est dédié à la mise au point de simulations numériques du découpage afin de s'affranchir des essais expérimentaux longs et coûteux. Ces simulations numériques avec la méthode des éléments finis sont réalisées généralement en deux dimensions. Elles ont pour objectif une étude paramétrique de la découpe en vue de prédire le comportement d'une tôle suivant les conditions de découpe. Durant le découpage, le matériau subit des sollicitations complexes dont la modélisation est souvent non linéaire. Il est soumis à des phénomènes d'endommagement et de rupture. Cela signifie qu'il y a une difficulté à prédire correctement l'évolution dans le temps des phénomènes liés au découpage. Lors de certaines des simulations présentées plus haut, des prédictions de l'aspect du bord découpé sont réalisées en fonction des conditions de découpe. En outre, dans ces simulations l'usure des poinçons est modélisée généralement par un rayon parfait de son arête coupante. L'évolution de l'usure est analysée en suivant la variation de ce rayon en fonction du nombre de cycles de découpe. Or, le relevé réel d'un profil d'usure sur un poinçon montre généralement une usure plus significative sur la partie verticale du poinçon en comparaison de l'usure de sa partie basse. Ainsi, une prédiction du profil d'usure sous sa forme réelle au lieu

d'un rayon parfait, semblerait plus adéquate pour la quantification et l'analyse de l'usure totale d'un poinçon.

Chapitre 2

Caractérisation des matériaux

Liste des figures et tableaux

Figure 2. 1: Dispositif de mesure optique InfiniteFocus®	60
Figure 2. 2 : Image 3D d'une piste de frottement sur une tôle en alliage de cuivre	61
Figure 2. 3 : Montage de l'éprouvette de traction.....	63
Figure 2. 4: Géométrie des éprouvettes de traction.....	63
Figure 2. 5: Allure de la courbe contrainte/déformation issues d'un essai de traction (CuFe0.1P0.03).....	64
Figure 2. 6: Illustration de la répétitivité des mesures pour deux essais de traction.....	64
Figure 2. 7: Opération de découpe : phase de glissement / frottement du poinçon sur la tôle.....	67
Figure 2. 8: Tribomètre à configuration pion / disque	67
Figure 2. 9: Tribomètre de type ouvert [Nathan 1966]	68
Figure 2. 10: Emplacement du tribomètre dans la ligne de découpage.....	69
Figure 2. 11: Vue d'ensemble du tribomètre de configuration bille sur plan à translation continue.....	69
Figure 2. 12: Représentation schématique de la configuration de contact bille/tôle.....	70
Figure 2. 13: Images Optiques d'une bille neuve et d'une bille usée	71
Figure 2. 14: Volume usé sur une bille	72
Figure 2. 15: Faciès d'usure d'une bille et exemple de profil d'usure.....	72
Figure 2. 16: Redressement de la forme sphérique d'une bille	73
Figure 2. 17: Volume usé sur une bille	73
Figure 2. 18: Trace laissée sur une tôle d'alliage de cuivre CuFe0.1P0.03	75
Figure 2. 19: Aspect d'un profil d'usure sur les surfaces des tôles	75
Figure 2. 20 : Taux d'usure des billes en fonction des nuances de tôles.....	77
Figure 2. 21 : Image MET de la tôle CuFe0.1P0.03 (Echelle 50nm)	78
Figure 2. 22: Influence de la distance de glissement sur le volume usé des billes.....	79
Tableau 2. 1 : Ensemble des tôles étudiées.....	57
Tableau 2. 2: Propriétés des tôles étudiées (données fournisseurs)	58
Tableau 2. 3 : Valeurs de dureté Vickers pour l'ensemble des tôles étudiées	62
Tableau 2. 4 : caractéristiques mécaniques des tôles déterminées par traction.....	65
Tableau 2. 5: Caractéristique des billes en carbure de tungstène	71
Tableau 2. 6: Conditions des essais effectués sur le tribomètre bille sur plan	71
Tableau 2. 7 : Valeurs des taux d'usure des billes en carbure de tungstène	74
Tableau 2. 8 : Volume d'usure des tôles en fonction de la distance totale de frottement	76
Tableau 2. 9 : Valeurs des taux d'usure des billes en carbure de tungstène	77

2. Chapitre 2 : Caractérisation des matériaux

2.1. Introduction

Le respect d'un cahier des charges sur les propriétés géométriques, mécaniques et physiques des produits fabriqués par découpage mécanique nécessite une maîtrise de très nombreux paramètres. Dans le domaine de la fabrication des connecteurs par exemple, où de nombreux alliages de cuivres sont utilisés, la durée de vie des poinçons est fortement influencée par les matières découpées. La nuance des tôles découpées est un paramètre où le rôle de la structure des matériaux est à considérer autant que le comportement mécanique des alliages. Cela peut expliquer la différence de quantité de bavures sur les pièces découpées, donc la propension d'un alliage à former plus ou moins de bavure, ainsi que la tenue à l'usure des poinçons lors de la découpe.

Ce chapitre sera donc consacré à la caractérisation des éléments poinçons et tôles intervenant lors de nos essais expérimentaux. Nous exposons les méthodes d'investigation utilisées pour les caractériser mécaniquement et structurellement afin d'identifier les relations entre les propriétés des matériaux intervenant lors de la découpe et les phénomènes d'usure et de bavure qui accompagnent l'opération.

En effet il a été établi [Hambli 1996] [Gréban 2006] que l'apparition et le niveau de bavure ainsi que l'usure des poinçons sont particulièrement influencées par les caractéristiques mécaniques et structurales des tôles découpées. On peut citer entre autres :

- ↳ L'état d'écrouissage du matériau,
- ↳ La structure métallographique, en particulier les tailles et formes de grain,
- ↳ La présence ou non de précipités, leur taille et forme associées ainsi que leur nature et donc les propriétés qui en découlent (dureté,...).

De ce fait, il sera mis en oeuvre un certain nombre d'analyses et d'observations permettant d'apporter des informations sur tout ou partie des caractéristiques citées ci-dessus.

Par ailleurs, l'utilisation dans nos essais de découpage d'une presse industrielle, nous a donné l'opportunité de concevoir et réaliser un essai de tribométrie en ligne, permettant d'étudier le contact entre un poinçon et une tôle dans des conditions représentatives de celles rencontrées lors d'une opération de découpage. En effet, étant donnée la configuration de glissement du poinçon sur la tôle, à savoir que le poinçon frotte sur une surface neuve de la

tôle à chaque coup de presse, l'utilisation d'un tribomètre classique n'est pas adaptée. De ce fait, la solution d'un tribomètre dit « ouvert » se devait d'être retenue. En effet dans cette configuration le frotteur ne repasse jamais au même endroit. L'étude de l'usure avec ce tribomètre nous permettra de pouvoir prédire les conséquences d'un changement de matériau de tôle ou de poinçon ou encore de lubrifiant sur la tenue à l'usure d'une configuration de découpe.

Ce type de dispositif et les informations qu'il est susceptible de donner peuvent contribuer par eux-mêmes à l'accroissement de la productivité des opérations de découpe. En effet le changement de paramètres opératoires (matériaux, lubrifiants, ...) d'un processus de découpe ne peut être optimisé que par une méthode d'essai sur presse de type essai/erreur qui est très coûteuse en temps et en coût.

En résumé ce chapitre va présenter les méthodes utilisées pour obtenir les informations nécessaires à la compréhension du rôle des différents paramètres matériaux intervenant dans la qualité d'une opération de découpe.

2.2. Matériaux étudiés

Dans le domaine de la fabrication, il est important de pouvoir connaître exactement l'influence de chaque paramètre sur la production. En effet, lors du procédé de découpage des tôles minces, différents paramètres influencent la création et les caractéristiques des pièces découpées et doivent être maîtrisés, notamment, la nature du couple outil découpant / matière découpée. Ces deux éléments constituent un facteur majeur dans le découpage, qui conditionne la productivité des entreprises.

L'évaluation de la durée de vie des outils en vue d'optimiser la production est nécessaire. L'utilisation des poinçons dépend de leur cinétique d'usure. Cette cinétique d'usure est le résultat de l'interaction du système tribologique constitué du poinçon et de la tôle découpée. En effet, lors des opérations de découpage des tôles en alliage de cuivre par un poinçon en carbure de tungstène, on observe généralement un phénomène d'usure abrasive qui peut être définie comme une perte de matière du poinçon engendrée par des phénomènes liés au frottement entre le poinçon et les tôles à découper.

L'objectif ici est de présenter les matériaux considérés dans le champ de notre étude. Concernant les tôles découpées, ils sont ceux les plus utilisés en production industrielle, à

savoir les alliages cuivreux. Quant à la matière des poinçons de découpe, il s'agit du carbure de tungstène.

2.2.1. Nuances des tôles étudiées

Le choix des matières à étudier a été mené à partir des principales familles d'alliages de cuivre découpées dans l'industrie des composants électroniques. La liste de ces tôles d'alliages de cuivre destinées à nos essais de découpage de précision est détaillée dans le *tableau 2.1*.

Types des alliages de cuivre	Nuances de tôles	Etat d'écrouissage	Epaisseur des tôles (mm)
Cuivres Alliés	CuFe0.1P0.03	H12 ⁽²⁾	0.254 / 0.38 / 0.5 / 0.8
Cuivre-béryllium	CuBe2	½ H	0.25
	CuBe2	prétraité	0.25
Bronzes	CuSn6	H12	0.2
	CuSn3Zn9	H12	0.25
Maillechorts	CuNi18Zn20	H12	0.2
Cupro-nickels	CuNi3Si	H12	0.2
Laitons	CuZn33	H12	0.25
Cuivres	CuAl	H12	0.25

Tableau 2. 1 : Ensemble des tôles étudiées

Les matériaux choisis sont donc des alliages cuivreux représentatifs des matières utilisées pour la fabrication des connecteurs et des composants électriques et électroniques pour l'automobile, l'informatique et l'électroménager. Le choix des alliages cuivreux dans l'industrie tient compte de l'ensemble de leurs propriétés fonctionnelles : les conductivités électrique et thermique, la résistance à la corrosion, la ductilité, l'aptitude à recevoir divers revêtements, l'aptitude au soudage et au brasage,... Ainsi, les tôles utilisées répondent à différentes exigences en termes de conductivité électrique et de résistance mécanique. Cependant dans le cas qui nous concerne, le cuivre y est généralement faiblement allié pour répondre aux critères mécaniques et garantir une conductivité électrique élevée [Gréban 2006].

Par ailleurs, le procédé d'élaboration de tôles métalliques le plus répandu est le laminage. De par sa nature, ce procédé confère aux grains constituant le matériau, une forte orientation suivant la direction de laminage. Il en résulte à la sortie, des tôles laminées

² Etat H12 résulte de 20 % d'écrouissage au laminage final des tôles.

marquées par un effet de fibrage à l'échelle microscopique et une texture, c'est à dire des orientations cristallographiques préférentielles. Le mode d'élaboration du cuivre et l'apport d'éléments d'addition influencent également directement les propriétés fondamentales des tôles. Ainsi, le comportement et les caractéristiques de ces tôles sont étudiés avant leur mise en forme par un des procédés de transformation de la matière.

Les données matérielles des fournisseurs (*tableau 2.2*) ont été complétées ou précisées par un ensemble de tests et d'essais réalisés en laboratoire. Ces données supplémentaires nous aideront à analyser certains résultats du plan d'expérience lors de nos essais expérimentaux.

	Rm (MPa)	Rp 0.2 (MPa)	A50 (%)
CuFe0.1P0.03 (H12)	300-380	<300	<15
CuBe2 (½ H)	480	<240	<47
CuBe2 (prétraité)	760	<720	<5
CuSn6 (H12)	340-430	<300	<40
CuSn3Zn9 (H12)	340-440	<300	<40
CuNi18Zn20 (H12)	380-450	<250	<27
CuNi3Si (H12)	440	430	<10
CuZn33 (H12)	380-450	>320	<12
CuAl (H12)	260-320	>250	<10

Tableau 2. 2: Propriétés des tôles étudiées (données fournisseurs)

L'ensemble des matériaux du *tableau 2.2*, sauf le CuBe2 ½ H et le CuBe2 prétraité, sont dans l'état *H12* qui résulte de 20 % d'écrouissage après laminage. Les déformations plastiques exécutées à froid, modifient plus ou moins rapidement les caractéristiques mécaniques des métaux et alliages. Généralement, l'écrouissage est recherché dans les tôles en alliages de cuivre, pour en augmenter la résistance aux déformations. Mais, si l'écrouissage est nécessaire pour l'objet terminé, il devient vite une gêne et un obstacle, en rendant la mise en forme difficile, avant l'apparition de fissures.

2.2.2. Matière des poinçons utilisés

Les tôles présentées précédemment ont été découpées avec des poinçons en carbure de tungstène. À partir de poudres de carbure de tungstène et de liant Cobalt, des ébauches pour poinçons de découpe sont réalisées. Par la suite, deux types d'usinages sont utilisés afin de procéder à la finition des surfaces des arêtes coupantes des poinçons. Il s'agit de l'usinage par rectification et l'usinage par fil.

Le carbure de tungstène est une céramique dure qui, combinée au cobalt à hauteur de 6 à 10% forme un cermet (métal céramique) très résistant. Ce matériau a été mis au point pour la fabrication d'outils coupants, du fait qu'il contient des grains durs de céramique de quelques micromètres dans une matrice de métal malléable. Le matériau qui en résulte peut supporter des tensions de compression élevées pendant le découpage tout en ayant de bonnes caractéristiques de résistance à l'usure et à l'oxydation aux températures élevées. Le carbure de tungstène a de plus une résistance élevée aux chocs thermiques, si bien qu'il peut résister aux fluctuations rapides de la température.

2.3. Caractérisation structurale des tôles

Les moyens employés pour observer la morphologie et la microstructure des tôles traitées sont la microscopie optique, la microscopie électronique à balayage (MEB) et la microscopie électronique en transmission (MET). Ces moyens seront combinés afin de réaliser une évaluation structurale complète des matériaux étudiés.

2.3.1. Techniques de caractérisation utilisées

2.3.1.1. Microscopie optique

L'appareil utilisé est le système de topomicroscopie *InfiniteFocus®* de la société *Alicona Imaging (Autriche)* (figure 2.1). Il est décrit en détail ici y compris pour des fonctionnalités dont nous nous servirons plus tard. La topomicroscopie est la combinaison de deux informations : la microscopie et la microtopographie. Le dispositif est basé sur un microscope optique couplé à une caméra. Contrairement à un microscope confocal, qui utilise un capteur monochromatique, l'appareil employé fonctionne avec un capteur de contraste en couleurs. Il génère une information topographique combinée à une image en couleurs à partir de la variation de focalisation. Par la suite, le logiciel reconstruit cette information en une mesure 3D précise.



Figure 2. 1: Dispositif de mesure optique InfiniteFocus®

Le système *InfiniteFocus*® de métrologie optique fonctionne suivant un principe qui combine la faible profondeur de champ d'un système optique avec un balayage vertical. Sur toute une plage de hauteur, le microscope collecte des images qui sont ensuite analysées par le logiciel. Celui-ci analyse chaque pixel et le compare à ses voisins pour vérifier s'il est focalisé ou non. Il reconstruit ensuite une image en trois dimensions à partir de ces points focalisés. A partir de cette image, des mesures dimensionnelles de surface, de volume, d'état de surface ou de topographie sont possibles.

L'échantillon à analyser est placé sur une platine motorisée et éclairée par une lumière blanche qui peut être modulée. On acquiert des images en continu pendant que la distance échantillon/objectif évolue. Le choix de la zone à mesurer se fait directement dans l'image optique.

La résolution verticale et latérale du microscope est définie par le choix de l'objectif. En effet, suivant l'objectif sélectionné, la taille de l'image varie de $2,1 \times 1,6 \text{ mm}^2$ à $103 \times 83 \text{ }\mu\text{m}^2$ et la résolution en hauteur de 444 nm à 20 nm. Si l'échantillon ou la zone à mesurer est plus grande que la taille de capture de l'objectif sélectionné, il est alors possible de réaliser une acquisition multi champs grâce à la platine motorisée. Il suffit de repérer l'ensemble de la zone à analyser, et par intercorrélation d'images entre champs acquis avec recouvrements, on reconstruit une image à champs jointifs.

A partir d'une même acquisition, deux types d'informations peuvent être générées; la topographie de surface et l'image optique (*figure 2.2*).

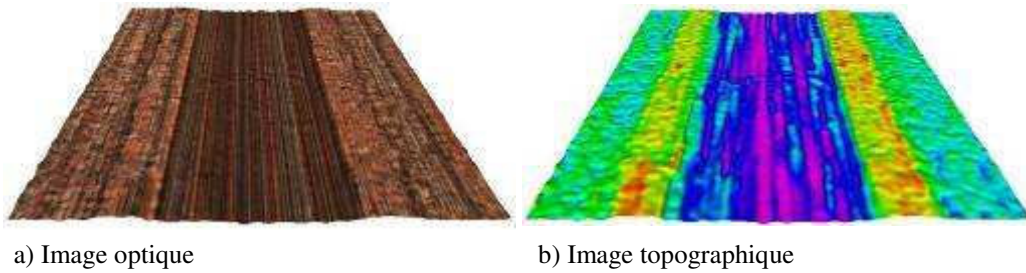


Figure 2. 2 : Image 3D d'une piste de frottement sur une tôle en alliage de cuivre

2.3.1.2. Microscope électronique à balayage (MEB)

L'observation des matériaux des tôles étudiées avec un microscope électronique à balayage permet de connaître la structure des matériaux (taille des grains, joints de grains et présence de macles).

La morphologie et la microstructure des tôles ont été observées avec un microscope électronique à balayage JEOL (modèle JSM 840). Les échantillons ont été préparés par polissage mécanique suivi d'un polissage électrolytique dans un bain de composition: $132 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O} + 268 \text{ cm}^3 \text{ H}_3\text{PO}_4 + 150 \text{ cm}^3$ d'éther monobuthylique de l'éthylène glycol. La structure est ensuite révélée par une attaque au perchlorure de fer avant observation au microscope électronique à balayage.

2.3.1.3. Microscope électronique en transmission (MET)

En ce qui concerne l'utilisation du microscope électronique en transmission, cela constitue une approche courante pour détecter la présence éventuelle de précipités. Afin de réaliser des clichés avec le MET, plusieurs opérations successives sont nécessaires pour préparer un échantillon adéquat à partir de chaque tôle de départ (épaisseur $\approx 0.25\text{mm}$). Tout d'abord, un prélèvement d'un carré d'environ 2.1mm de côté est réalisé à l'aide d'une scie à fil. Les pièces ainsi obtenues ont ensuite été amincies par un polissage mécanique jusqu'à ce que l'épaisseur de l'échantillon atteigne environ $100\mu\text{m}$. A partir de cette lame mince à faces parallèles un « cratère » est creusé sur chaque face avec une meule concave, afin de réduire l'épaisseur au centre de l'échantillon à $20 \mu\text{m}$. Pour finir, un bombardement ionique (Ar^+) est utilisé pour percer l'échantillon en son centre et obtenir une zone très mince sur les bords du trou au centre de l'échantillon.

2.4. Caractérisation mécanique des tôles

Comme cela a été précisé plus haut, dans le domaine du découpage les caractéristiques mécaniques des tôles découpées influencent également fortement le résultat de la découpe. Nous allons déterminer ici les principales propriétés mécaniques des tôles étudiées.

2.4.1. Essais de microdureté Vickers

La dureté qualifie la capacité d'un matériau à résister à la déformation, mais elle se définit aussi comme la résistance mécanique qu'un corps oppose à la pénétration d'un autre corps plus dur. La microdureté Vickers des alliages de cuivre étudiés est mesurée dans le plan des tôles sous une charge de 200g avec un appareil Shimadzu (*modèle HMV-M*). L'incertitude de mesure est de ± 2 Hv (sur cinq mesures consécutives). Les résultats des mesures de la dureté sont regroupés dans le *tableau 2.3*.

Nuances des tôles	Etat d'écrouissage	Dureté (Hv)
CuFe0,1P0,03	H12	120
CuSn6	H12	190
CuNi18Zn20	H12	185
CuNi3Si	H12	240
CuZn33	H12	110
CuAl	H12	100
CuBe2	½ H	180
CuBe2	Prétraité	400
CuSn32N9	H12	200

Tableau 2. 3 : Valeurs de dureté Vickers pour l'ensemble des tôles étudiées

2.4.2. Essais de traction uni-axiale

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus courant. Il sert à déterminer les principales propriétés mécaniques telles que le module d'élasticité, la limite d'élasticité, la résistance mécanique et l'allongement à la rupture.

Grâce à sa relative simplicité de mise en œuvre, sa facilité de dépouillement et sa fiabilité, ce test reste le premier outil pour la caractérisation du comportement des tôles. Il permet ainsi l'identification de leurs propriétés mécaniques. Pour pouvoir comparer les

caractéristiques des matériaux, nous allons mesurer les courbes de traction sur les alliages de cuivre, interpréter les résultats obtenus, déterminer la limite d'élasticité, l'allongement à rupture, etc. ... et estimer la précision de mesure.

Les essais de traction sont réalisés sur une machine *Instron* (modèle 6025) équipée de mors auto-serrants et d'une cellule de force de 5 KN. La mesure de la déformation des éprouvettes est réalisée grâce à un extensomètre de base 25 mm (figure 2.3).

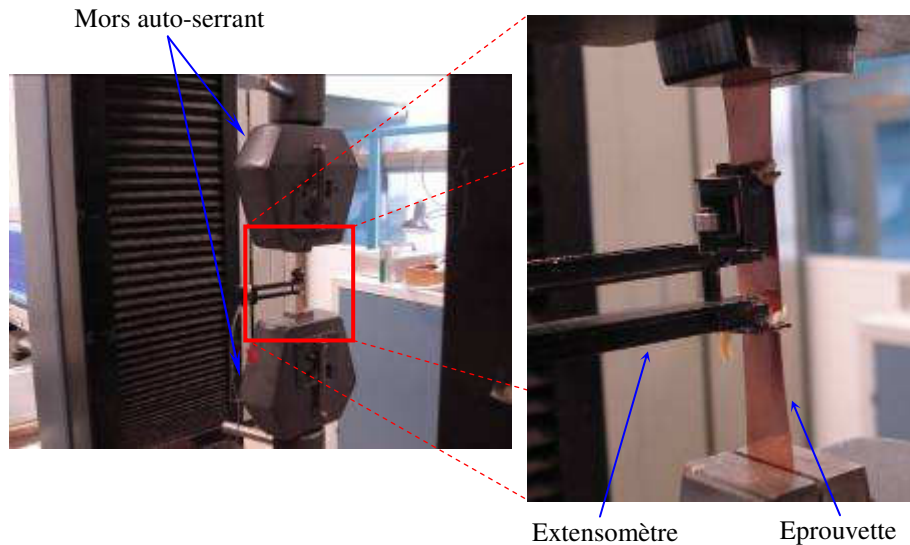


Figure 2. 3 : Montage de l'éprouvette de traction

La vitesse imposée lors des essais de traction est de 0.075 mm/s (ce qui correspond approximativement à une vitesse de déformation de 10^{-3} s^{-1}). Les éprouvettes sont soumises à un allongement croissant. La géométrie de ces éprouvettes (figure 2.4) correspond à la norme NF EN 10002-1.

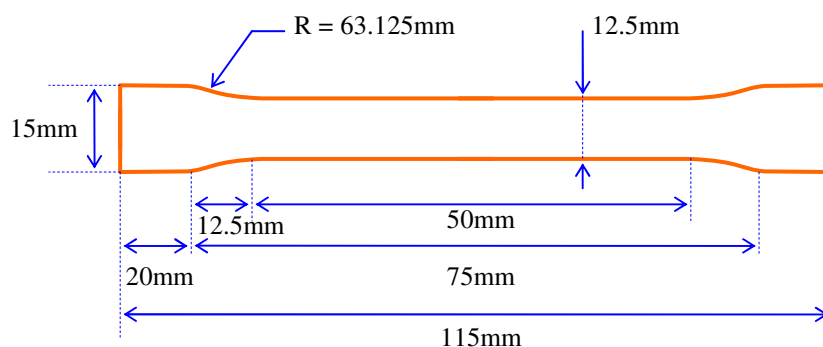


Figure 2. 4: Géométrie des éprouvettes de traction

Les informations enregistrées au cours de nos essais de traction sont la force, F , et la déformation en %. Cette dernière information est relevée par l'extensomètre mécanique qui mesure la variation de longueur entre deux points de chaque éprouvette. Les valeurs de la force sont transformées en contraintes conventionnelles, σ , en les rapportant à la valeur de la section initiale de l'éprouvette, S_0 .

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (2.1)$$

La figure 2.5 illustre l'allure que peuvent avoir les courbes de traction des différents matériaux étudiés. Ce graphe de traction représente l'évolution de la contrainte, σ , en fonction du pourcentage de déformation.

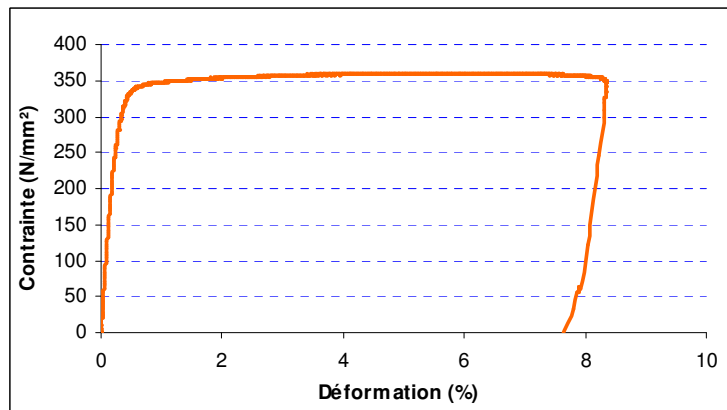


Figure 2. 5: Allure de la courbe contrainte/déformation issues d'un essai de traction (CuFe0.1P0.03)

Pour chacune des tôles étudiées, cinq éprouvettes de traction sont usinées. Ainsi, nous avons réalisé cinq essais de traction par nuance de tôle. La figure 2.6 représente la superposition de deux essais de traction sur les tôles de référence CuFe0.1P0.03.

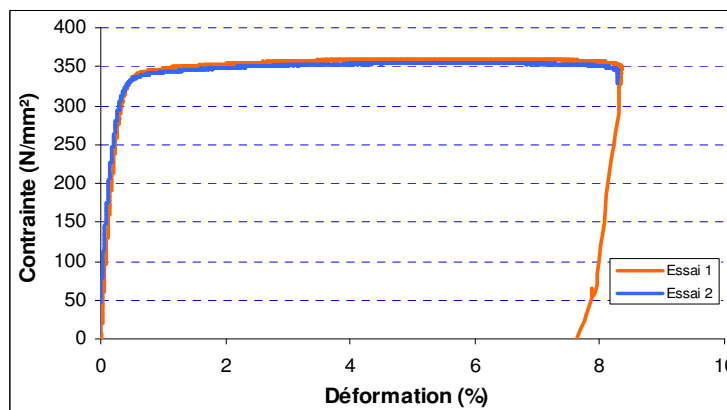


Figure 2. 6: Illustration de la répétitivité des mesures pour deux essais de traction

Par la suite, l'identification du comportement mécanique des tôles est réalisée. En effet les caractéristiques mécaniques, de chaque nuance de tôle, sont déterminées à l'aide des courbes de traction et les données des essais. Elles sont calculées à partir de la moyenne sur cinq résultats de traction.

Le tableau 2.4 rassemble les caractéristiques mécaniques moyennes déterminées expérimentalement pour l'ensemble des tôles étudiées.

Tôles	Module de Young (GPa)	Limite élastique 0.2% (MPa)	Charge de rupture (MPa)	A (%)
CuFe0.1P0.03	121	355	375	10
CuNi18Zn20	102	224	370	20
CuSn6	91	400	500	20
CuNi3Si	140	660	720	7
CuZn33	100	360	430	22
CuAl	95	250	350	14
CuBe2 (½ H)	130	635	980	15
CuBe2 (prétraité)	138	1195	1350	4
CuSn32N9	112	440	510	15

Tableau 2. 4 : Caractéristiques mécaniques des tôles déterminées par traction

Le module d'Young, noté E , qui est défini comme la pente de la partie linéaire de la courbe de traction, exprime la rigidité d'un matériau, donc sa capacité à résister à la déformation élastique.

D'autre part, on observe un comportement en traction de type plastique parfait pour l'ensemble des alliages étudiés. On note des écarts importants du seuil élastique selon la composition des nuances des tôles.

2.4.3. Essais de frottement et abrasivité des nuances de tôles étudiées

Dans la production de pièces par découpage, la qualité des pièces produites (quantité de bavure, aspect du bord découpé) dépend largement de la géométrie des poinçons ou encore des jeux poinçon/matrice. Cette géométrie dépend directement de la vitesse d'usure des outils de découpe en fonction du nombre de pièces découpées.

La maîtrise de l'usure des poinçons constitue donc un enjeu majeur dans l'optimisation de la production de pièces découpées. Par ailleurs, l'augmentation de la durée de vie des

poinçons et donc les coûts de production sont également directement liés à la conservation de leur intégrité géométrique.

Pour toutes ces raisons il est très important de pouvoir évaluer quantitativement la tenue à l'usure des poinçons via une métrologie de l'abrasivité des tôles vis-à-vis des matériaux pour poinçons. Pour ce faire il est nécessaire de disposer d'un outil expérimental simple permettant d'évaluer les différents taux d'usure des matériaux d'outils associés à la nuance de la tôle à découper afin d'éviter de longs et coûteux essais sur presse.

L'objet du présent travail est donc de mettre au point et de valider un tribomètre expérimental en ligne, représentatif des processus d'usure affectant les outils de découpe. Les résultats présentés illustreront le cas de la découpe de tôles d'alliages cuivreux avec des poinçons en carbure de tungstène.

2.4.3.1. Généralités

La tribologie est définie comme la science et la technologie des surfaces qui interagissent dans un mouvement relatif. L'analyse tribologique d'un système a pour principal objectif l'étude du frottement, de la lubrification et de l'usure sous leurs multiples aspects. Dans de nombreux cas, une réduction de l'usure est recherchée, ainsi qu'une minimisation du frottement, cause de dissipation d'énergie mécanique. Dans le cas de notre étude, à savoir l'interaction entre les poinçons et les tôles lors des opérations de découpage mécanique, peu d'usure des poinçons est souhaitée. Suite au frottement successif de la partie active d'un poinçon sur les tôles découpées (*figure 2.7*) une usure progressive s'installe. Cela a pour effet la dégradation de la qualité de découpe par évolution de la géométrie des outils.

En général les conditions de frottement et les mécanismes d'endommagement dépendent d'une multitude de facteurs constituant un tribosystème :

- ↳ Propriétés des deux matériaux en contact,
- ↳ Caractéristiques du troisième corps (débris d'usure et/ou lubrifiant) situé à l'interface,
- ↳ Mouvements relatifs des corps en contact (cinématique), efforts appliqués et efforts transmis par le contact, et environnement du contact (atmosphère, température).

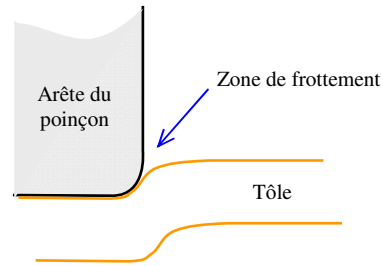


Figure 2. 7: Opération de découpe : phase de glissement / frottement du poinçon sur la tôle

Comme cela a été précisé précédemment, l'utilisation d'une presse, donc d'une ligne de production pour réaliser des tests d'usure n'est pas une solution simple et économique. Il est donc judicieux de pouvoir simuler sur un tribomètre les phénomènes d'usure à étudier. Toutefois, pour ce faire il est nécessaire d'en établir et valider le principe. Comme nous le verrons dans ce travail un certain nombre d'essais vont être réalisés sur presse et permettre ainsi de construire ce tribomètre directement sur la ligne. Ce principe autorise des longueurs de glissement importantes du fait du nombre élevé de pièces découpées.

Un tribomètre est un appareil utilisé généralement pour la mesure des forces de frottement de deux surfaces en mouvement l'une par rapport à l'autre et des grandeurs relatives à l'usure. Son principe général consiste à faire frotter un matériau sur un autre dans un environnement choisi et contrôlé afin d'étudier le comportement de l'un ou des deux matériaux. En fonction des conditions expérimentales que l'on voudra appliquer, on choisira une géométrie parmi les nombreuses combinaisons possibles pour se placer au plus près des conditions de contact souhaitées. L'une des géométries classiques est par exemple la géométrie pion / disque schématisée sur la figure 2.8.

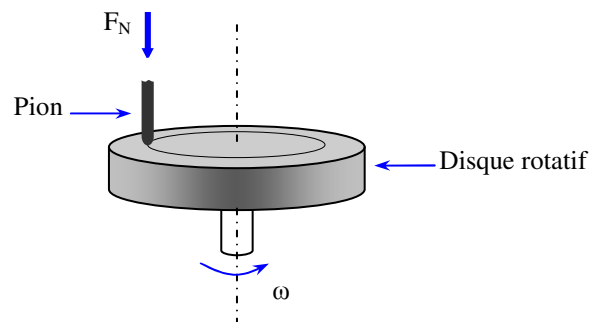


Figure 2. 8: Tribomètre à configuration pion / disque

Ce type de tribomètre est souvent utilisé car son principe rotatif permet d'accéder à des longueurs de glissement très importantes. Cette configuration se caractérise par une piste de glissement dite « fermée », où le pion frotte toujours sur la même surface dégradée. A l'opposé de ce type de tribomètre, il existe d'autres tribomètres dits « ouverts », où la piste de frottement est renouvelée continuellement. La figure 2.9 présente un exemple de ce type de tribomètre [Nathan 1966].

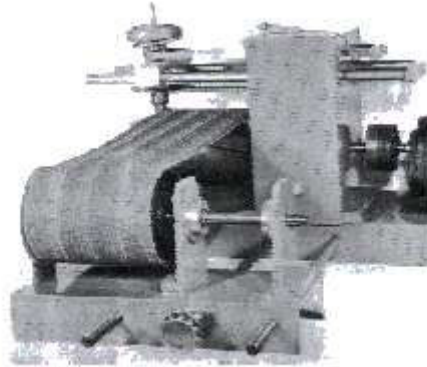


Figure 2. 9: Tribomètre de type ouvert [Nathan 1966]

Dans cet exemple un pion est en contact avec une courroie revêtue d'abrasifs. La courroie se déplace horizontalement à une vitesse choisie, le pion se déplace en simultané transversalement pour frotter en permanence sur un abrasif neuf. Ceci permet de disposer d'une grande longueur de glissement et ce en face d'un abrasif à l'état neuf constamment renouvelé.

2.4.3.2. Principe et description du dispositif expérimental de tribométrie

Le tribomètre qui a été utilisé dans le présent travail est destiné à mesurer l'usure en amont d'une opération de découpe dans des conditions contrôlées. Il a été élaboré afin de simuler au mieux les conditions de frottement d'un poinçon sur les tôles à découper. Cette simulation a été opérée via l'application d'une charge sur un pion dont on veut mesurer l'usure en fonction de la longueur de défilement de la tôle. De plus, le tribomètre décrit ci-après a été conçu et construit spécifiquement de façon à être intégré à une ligne de découpage (figure 2.10). Il permet de tester directement les différentes conditions opératoires utilisées lors des essais de découpage sur presse.

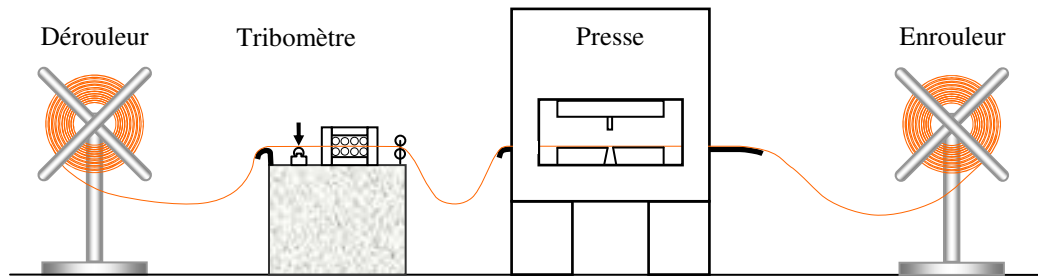


Figure 2. 10: Emplacement du tribomètre dans la ligne de découpage

La configuration du tribomètre utilisé pour étudier l'usure des poinçons sous frottement avec des tôles en alliages de cuivre est de type bille sur plan (*figure 2.11*). Notre choix s'est porté sur un pion sphérique constitué d'une bille en carbure de tungstène. Il s'agit d'une bille de 5mm de diamètre réalisée dans la même nuance que celle des poinçons utilisés pour les essais expérimentaux de découpage sur presse.

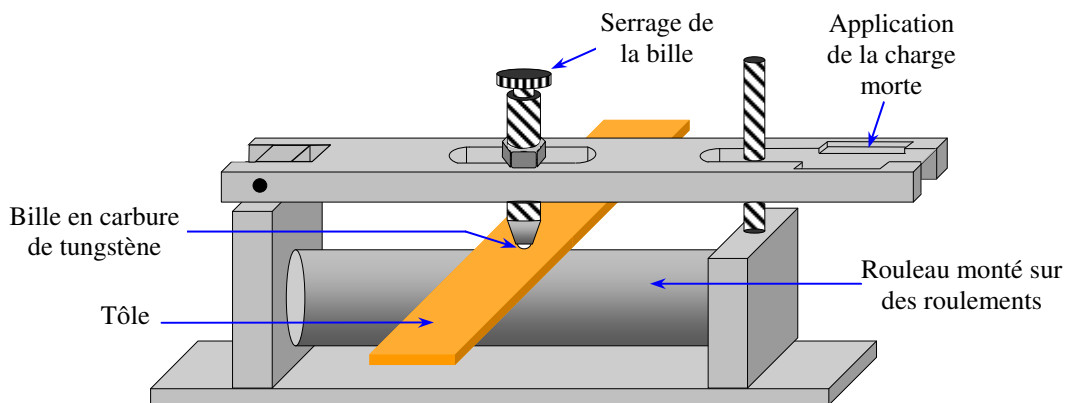


Figure 2. 11: Vue d'ensemble du tribomètre de configuration bille sur plan à translation continue

Ce tribomètre peut être considéré de la famille des tribomètres dits ouverts. Il comprend un pion sphérique et un rouleau facilitant le mouvement des tôles. Il est utilisé pour déterminer l'abrasivité des différentes nuances de tôles vis-à-vis du matériau des poinçons.

Le test consiste à appliquer une charge normale sur une bille fixe en contact avec la tôle qui, elle-même, est animée d'une translation continue afin d'alimenter la presse de découpe (*figure 2.12*). La vitesse de défilement de la bande de matière est constante, elle est fonction de la cadence de découpe imposée à la presse.

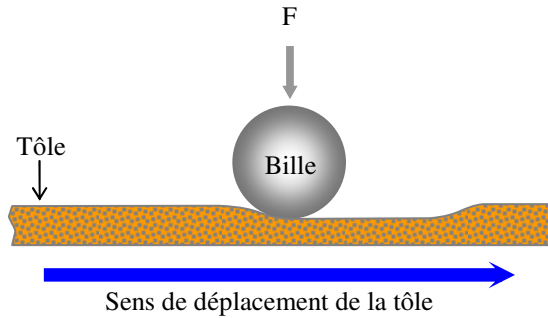


Figure 2. 12: Représentation schématique de la configuration de contact bille/tôle

Dans la configuration ainsi fixée, le circuit de glissement est ouvert, en effet, la piste d'usure sur la tôle est constamment renouvelée. Dans les essais tribologiques classiques avec une configuration pion / disque, c'est toujours la même surface qui est sollicitée, étant donné que le circuit de frottement est fermé, ce qui n'est pas le cas du frottement poinçon/tôle lors de la découpe. Gréban [Gréban 2006], qui a utilisé un essai de frottement sur un tribomètre classique pion / disque, a pu constater que malgré la facilité de réalisation de cette méthode, les conditions opératoires sont très différentes du découpage. En effet, le pion frotte toujours sur la même surface du disque alors que le poinçon frotte sans cesse sur de la matière « neuve », permettant une meilleure évacuation des débris d'usure par exemple. Les résultats qu'il avait obtenus à l'époque n'avaient pas pu être valablement exploités.

Ainsi construit, le tribomètre en ligne devrait permettre d'évaluer la résistance à l'usure des poinçons en mesurant le taux d'usure comparatif pour différents couples poinçon/tôles. Pour ce faire le critère d'usure adopté est la détermination de la quantité de matière usée sur les billes.

2.4.3.3. Paramètres et conditions expérimentales de frottement

Pour les tests de frottement, le glissement se fait sans lubrification et à vitesse constante. La vitesse est imposée et limitée par la cadence choisie pour les opérations de découpe. Les essais sont donc réalisés à vitesse constante et à charge imposée. Celle-ci est déterminée par le choix d'une charge morte au contact de la bille sur la tôle à tester.

Comme indiqué plus haut les billes sont en carbure de tungstène. Cette nuance de matériau est la même que celle des poinçons utilisés pour les essais expérimentaux sur presse de découpage. Les caractéristiques essentielles des billes sont indiquées dans le *tableau 2.5*.

Matière de la bille	Composition chimique	Dureté	Densité Kg/dm ³
Carbure de tungstène	94 % WC + 6 % Co	1550 HV	14.90

Tableau 2. 5: Caractéristique des billes en carbure de tungstène

L'ensemble des valeurs et conditions opératoires de l'essai d'usure en ligne sont résumées dans le tableau 2.6.

Charge	7 N
Configuration	Bille / Plan
Matière des billes	Carbure de tungstène
Diamètre des billes	5 mm
Vitesse	37 mm/s

Tableau 2. 6: Conditions des essais effectués sur le tribomètre bille sur plan

2.4.3.4. Evaluation de l'usure des billes (frotteur)

Avant et après chaque essai de frottement, la bille en carbure de tungstène est contrôlée afin de détecter une éventuelle perte de matière. L'observation par microscopie optique du faciès d'usure de la bille est la méthode d'évaluation retenue pour la mesure du volume usé (figure 2.13). Le dispositif de mesure employé est le système de topomicroscopie *InfiniteFocus*® décrit dans le paragraphe 3.1.1.

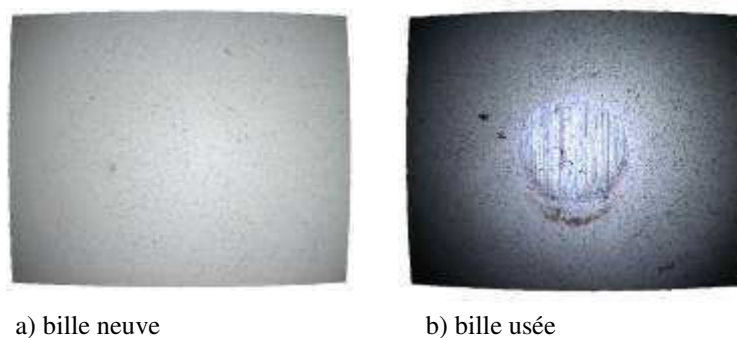


Figure 2. 13: Images Optiques d'une bille neuve et d'une bille usée

En théorie, le frottement de la bille sur un plan engendre la formation d'un méplat, permettant de déduire le volume de matière perdue par celle-ci. Ce volume est équivalent à celui de la calotte sphérique délimitée par le méplat dont il suffit de mesurer le rayon r (figure 2.14).

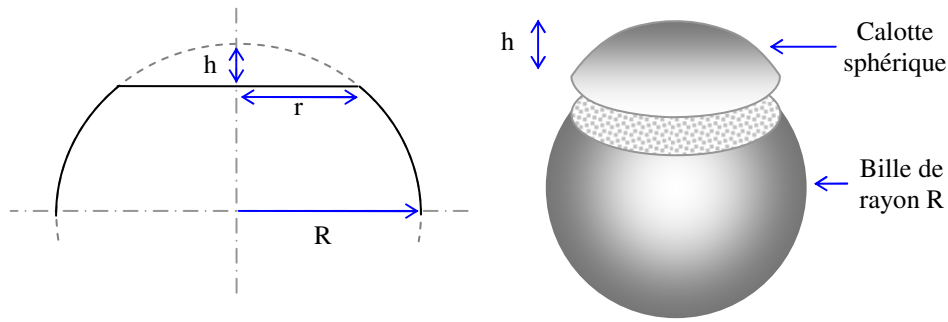


Figure 2.14: Volume usé sur une bille

Avec cette hypothèse, le volume d'usure d'une bille $V_{\text{usé/bille}}$ est calculé par l'expression suivante :

$$V_{\text{usé/bille}} = \pi \times h^2 \times (R - h/3) \quad (2.2)$$

Avec :

$$h = R - \sqrt{R^2 - r^2} \quad (2.3)$$

Toutefois l'évaluation de l'usure des billes à l'aide des précédentes équations, n'est pas assez précise. En effet, l'endommagement des billes ne consiste pas en un parfait méplat d'usure (*figure 2.15*). Sur les faciès d'usure des billes, nous observons des stries d'abrasion dont le volume de matière enlevée contribue d'une manière non négligeable au volume total perdu par usure.

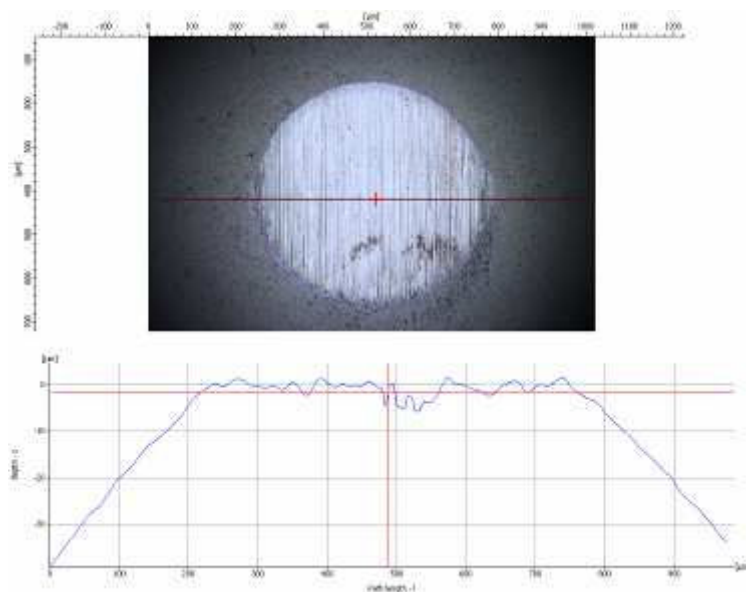


Figure 2.15: Faciès d'usure d'une bille et exemple de profil d'usure

Par ailleurs, sur certaines billes on observe une très légère coloration indiquant la présence d'une couche de transfert de cuivre sur le carbure de tungstène. Cela est l'indicateur d'un processus d'usure adhésive. Toutefois ce transfert n'est pas mesurable avec les moyens dont nous disposons. Néanmoins, afin de ne prendre en compte que l'usure par abrasion, avant chaque mesure, les billes sont nettoyées dans un bain ultrasonique d'éthanol afin d'éliminer les débris d'usure pouvant adhérer à celles-ci.

La mesure alternative qui sera mise en oeuvre pour déterminer la forme de la calotte sphérique de la bille neuve et du « méplat » sur les billes usées est réalisée à partir d'une capture topographique de l'image 3D des frotteurs sur un microscope confocal *Alicon*®.

Après l'acquisition d'une image de bille usée en 3D, un traitement numérique est réalisé, à l'aide du logiciel *Gwyddion*®, afin de s'affranchir de la forme sphérique de la bille à l'état neuf. Cette opération permet d'obtenir un plan de référence (figures 2.16 et 2.17). Ce qui facilite par la suite la détermination du volume usé sur chaque bille avec le logiciel *Surfcom*®.

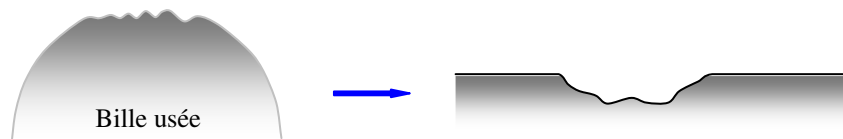


Figure 2. 16: Redressement de la forme sphérique d'une bille

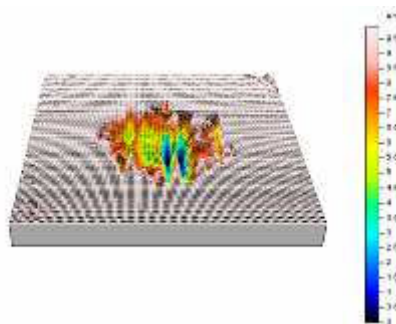


Figure 2. 17: Volume usé sur une bille

La mesure des volumes usés est réalisée ensuite par intégration du volume sous ce plan de référence associé à la surface des billes, obtenu après l'enlèvement de la forme sphérique. A titre indicatif le *tableau 2.7* présente une comparaison des résultats entre la mesure du volume usé sur les billes par l'équation (2.2) et celle réalisée par la méthode alternative présentée plus haut.

Billes (Carbure de tungstène)	Tôles (Alliage de cuivre)	Mesure du volume usé par l'équation (1) $V1 = (\text{mm}^3)$	Mesure optique du Volume usé $V2 = (\text{mm}^3)$	Ecart de mesures $(V1-V2)/V1$
Bille 1	CuFe0.1P0.03	2.79E-04	3.31E-04	-1.19
Bille 2	CuZn33	1.01E-05	1.19E-05	-1.18
Bille 3	CuAl	3.14E-13	3.56E+13	-1.13
Bille 4	CuFe0.1P0.03	2.20E-05	3.50E-05	-1.59
Bille 5	CuSn3Zn9	9.91E-06	9.95E-06	-1.00
Bille 6	CuFe0.1P0.03	1.95E-04	2.80E-04	-1.44

Tableau 2. 7 : Valeurs des taux d'usure des billes en carbure de tungstène

On constate que la mesure directe, avec l'équation donnant le volume de la calotte sphérique, sous-estime le volume de la matière perdue par usure sur certaines billes (billes 1, 4 et 6). D'autre part, pour le reste des billes, les deux mesures sont relativement équivalentes. Ainsi, ce sont les mesures du volume usé par la deuxième méthode qui seront considérées afin de déterminer l'abrasivité des tôles vis-à-vis des billes.

2.4.3.5. Evaluation de l'usure des tôles

Après chaque essai de frottement, nous observons les pistes de frottement sur les tôles. Ces observations sont réalisées avec le microscope *InfiniteFocus*®. A l'aide des images topographiques 3D (*figure 2.18*) nous avons réalisé des mesures dimensionnelles sur les traces de frottement sur les tôles. Ces mesures sont réalisées dans le but de quantifier l'usure sur les tôles en fonction de la longueur de frottement, mais elles ne seront pas utilisées pour le calcul des taux d'usure. Grâce à cette méthode les différentes caractéristiques permettant de quantifier l'usure des tôles sont disponibles.

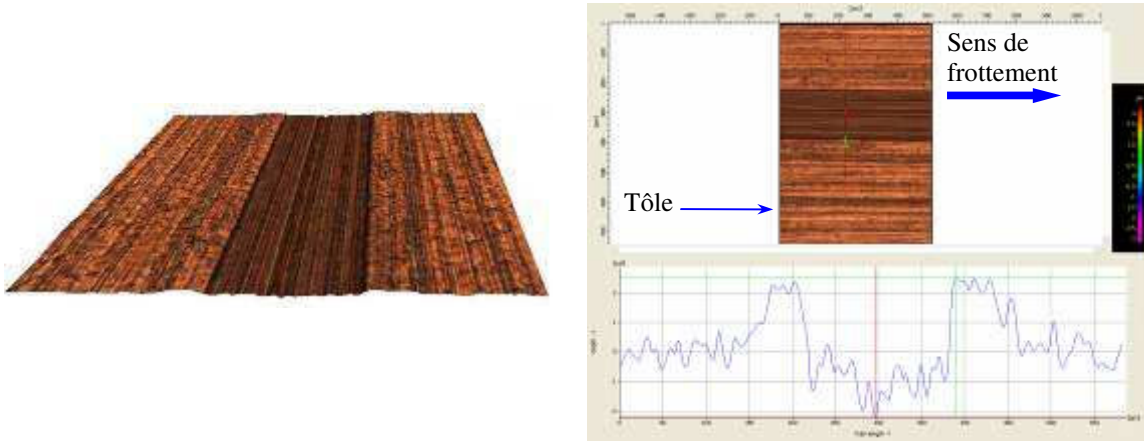


Figure 2. 18: Trace laissée sur une tôle d'alliage de cuivre CuFe0.1P0.03

Pour l'étude de la section des stries, un profil ou la moyenne de plusieurs profils peuvent être tracés sur l'image topographique ce qui permet la mesure des dimensions des stries (figure 2.19).

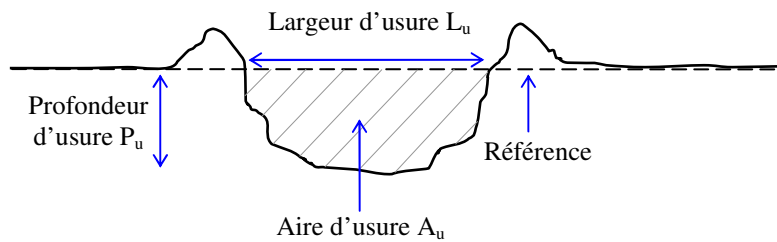


Figure 2. 19: Aspect d'un profil d'usure sur les surfaces des tôles

Pour chaque tôle quatre profils sont enregistrés selon des plans coupant transversalement la piste d'usure. Les caractéristiques d'usure des tôles (figure 2.19) sont ensuite relevées sur chaque enregistrement profilométrique. Le volume d'usure, $V_{usé/tôle}$, est équivalent au produit de l'aire d'usure, A_u , par la longueur de la piste de frottement total de la bille sur la tôle.

Le tableau 2.8 résume à titre indicatif les résultats de mesures de l'usure sur les tôles testées.

Tôles	Sections des stries (mm ²)	Distance totale de frottement (mm)	Volume d'usure total (mm ³)
CuFe0.1P0.03	1.52E-04	2.25E+06	3.42E+02
CuZn33	2.30E-04	1.71E+05	3.93E+01
Cua1	3.28E-04	2.25E+05	7.37E+01
CuFe0.1P0.03	1.04E-04	2.25E+05	2.33E+01
CuSn3Zn9	1.74E-04	1.89E+05	3.28E+01
CuFe0.1P0.03	1.08E-04	2.03E+06	2.18E+02

Tableau 2. 8 : Volume d'usure des tôles en fonction de la distance totale de frottement

2.4.3.6. Evaluation du coefficient d'usure de la bille

Le dispositif de tribométrie employé a ainsi permis de caractériser l'abrasivité de matériaux de tôles en alliage de cuivre vis-à-vis des poinçons de découpe. L'évaluation d'un taux d'usure pour chacun des matériaux de tôle testés a été réalisée à partir de la valeur comparative des volumes usés précédemment déterminés. Ainsi, on peut obtenir une indication de la sévérité comparée de l'usure des poinçons pour chacune des tôles.

Le taux d'usure volumique, K , est obtenu à partir de la variation de masse ou de géométrie du frotteur pour une charge et une distance de frottement données. Il est déterminé, dans notre cas, en divisant le volume usé d'une bille, $V_{usé/bille}$, par la charge appliquée, F_N , et la distance totale de glissement, S :

$$K = \frac{V_{usé/bille}}{F_N \times S} \quad (2.4)$$

Cette équation est tirée de la loi d'Archard (voir chapitre 1) qui donne le volume d'usure :

$$V_{usé/bille} = K \times F_N \times S \quad (2.5)$$

La charge normale, F_N , étant connue, et le volume usé de chaque bille mesuré, il reste à relever les longueurs de glissement sur les tôles. Le frottement se fait sur des longueurs contrôlées du fait du réglage de l'avance automatique de la presse. Ainsi on connaît les longueurs de glissements correspondant à chaque bille à la fin des essais de frottement.

Les valeurs du taux d'usure volumique des billes, K , sont rassemblées dans le *tableau 2.9* et représentées graphiquement pour les différentes tôles utilisées sur la *figure 2.20*.

Billes (Carbure de tungstène)	Tôles (Alliage de cuivre)	Taux d'usure (mm ² /N) (x1e-11)
Bille 1	CuFe0.1P0.03	2.10
Bille 2	CuZn33	0.99
Bille 3	Cua1	2.26E-08
Bille 4	CuFe0.1P0.03	2.22
Bille 5	CuSn3Zn9	0.75
Bille 6	CuFe0.1P0.03	1.98

Tableau 2. 9 : Valeurs des taux d'usure des billes en carbure de tungstène

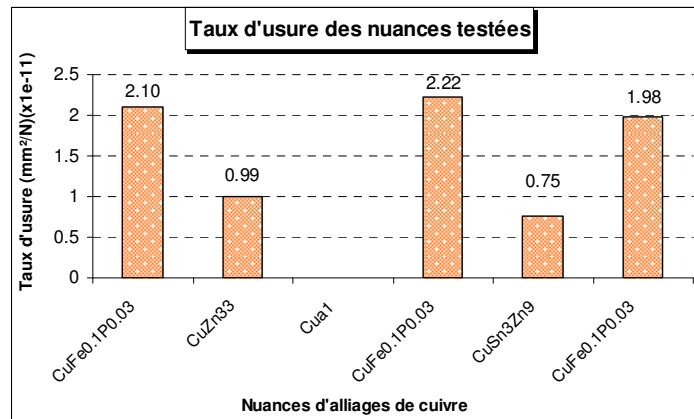


Figure 2. 20 : Taux d'usure des billes en fonction des nuances de tôles

Il est possible de tirer différentes informations de l'analyse des valeurs du taux d'usure obtenu pour les différents couples bille/tôle. La première constatation en observant ces valeurs pour le couple bille/tôle CuFe0.1P0.03, qui a été testé trois fois, est la reproductibilité des mesures. Il est à noter que ces trois essais de frottement ont été effectués sur trois longueurs de glissements différentes.

L'observation des valeurs de taux d'usure montre que c'est la tôle CuFe0.1P0.03 qui est la plus abrasive vis-à-vis de la bille en carbure de tungstène et c'est la tôle Cua1 qui est la moins abrasive vis-à-vis de la bille. Sur cette dernière on mesure peu de matière perdue par usure sur le frotteur. La tôle Cua1 est composée de cuivre pur, contrairement à la tôle CuFe0.1P0.03 qui contient des composés durs sous forme de fins précipités. En effet, l'analyse de cette tôle au microscope électronique en transmission (MET) (*figure 2.21*), montre la présence des précipités métalliques (Fe₂P) de tailles variables (35 à 137nm) qui sont responsables de l'abrasivité élevée de cette nuance.

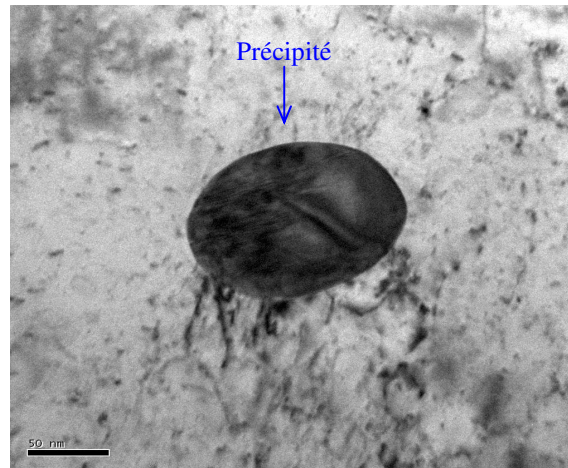


Figure 2. 21 : Image MET de la tôle CuFe0.1P0.03 (Echelle 50nm)

Ces résultats permettent également d'établir une hiérarchie de l'abrasivité des différentes nuances de tôle vis-à-vis d'un poinçon en carbure de tungstène. On constate que celle-ci peut varier dans des proportions très importantes (facteur supérieur à 3). Toutefois, il reste à vérifier que cette hiérarchie obtenue sur un tribomètre de laboratoire est conforme aux observations faites sur une presse de découpe.

2.4.3.7. Influence de la distance de glissement

L'équation d'Archard implique que si le taux d'usure, K , est constant pour un système de glissement donné alors le volume de matière perdue sera proportionnel à la distance de glissement.

Durant nos essais expérimentaux une tôle de référence a été découpée à plusieurs étapes afin de vérifier le déroulement des essais de découpage. Cela nous a donné l'occasion de réaliser des tests de frottement avec la même nuance de tôle à différentes longueurs de glissement. La *figure 2.22* représente l'évolution du volume de l'usure des billes de carbure de tungstène en fonction des distances de glissement sur des tôles en alliage de cuivre dans la nuance CuFe0.1P0.03.

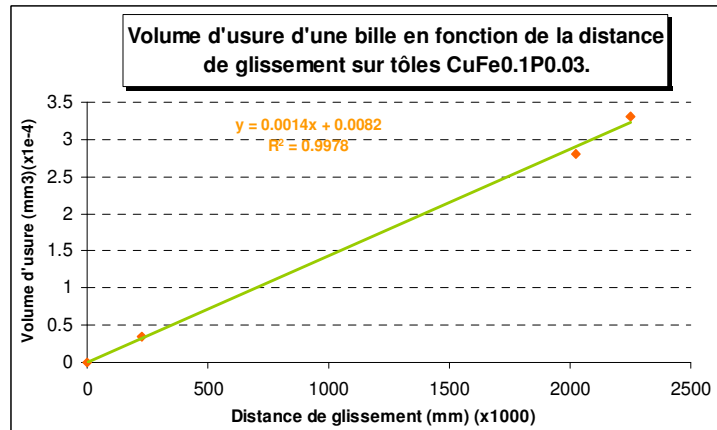


Figure 2. 22: Influence de la distance de glissement sur le volume usé des billes

Cet enregistrement nous montre une dépendance linéaire de l'usure des billes en fonction de la longueur de glissement. Ainsi, le couple de frottement représenté sur la figure 2.22, à savoir une tôle CuFe0.1P0.03 et la bille en carbure de tungstène, vérifie la loi d'Archard.

2.4.3.8. Conclusion

Afin de prédire la tenue à l'usure des poinçons de découpe il est nécessaire de connaître l'abrasivité des tôles à découper. Celle-ci n'est à priori mesurable qu'à l'issue d'un essai de découpe, généralement long et coûteux.

Pour remédier à ces inconvénients, un tribomètre en ligne a été développé pour mesurer cette abrasivité pendant l'opération elle-même. Ce système simple permet d'étudier l'influence de la nuance de tôle sur l'usure des outils en reproduisant les caractéristiques principales du contact poinçon / tôle.

Placé en amont de la presse ce dispositif permet de déterminer, à partir des volumes usés mesurés sur le frotteur, le taux d'usure associé à chaque nuance de tôle.

Par ailleurs, cette configuration de mesure permet d'obtenir même pour des nuances très peu abrasives comme le *Cua1*, des niveaux d'usure mesurables du fait de la grande longueur de glissement de tôle devant le frotteur.

Ainsi, les matériaux découpés peuvent être classés sur la base des taux d'usure ce qui permet notamment de prévoir la durée de vie des poinçons de découpe en se référant à des configurations connues.

Ces résultats autorisent dès à présent l'établissement d'un cahier des charges précis d'un tribomètre de laboratoire (ex-situ) qui permettrait de pouvoir évaluer toutes les solutions et

paramètres de découpe (matériaux constituant les poinçons et les tôles, lubrifiant, ...) hors d'une ligne de production. De plus, ce tribomètre permettrait également de déterminer le coefficient d'usure associé aux configurations testées en vue d'un calcul précis du volume d'usure des poinçons à partir d'une modélisation par éléments finis.

2.5. Conclusion

Nous avons réalisé un ensemble de caractérisation sur les nuances de tôles choisies pour les essais expérimentaux de découpage. Deux catégories de spécification ont été analysées : les propriétés structurales et les propriétés mécaniques des tôles. Ceci nous permettra de corréliser l'influence des propriétés mécaniques et de la microstructure des tôles sur la cinétique d'usure des poinçons d'une part, et la prédisposition de ces tôles à former plus ou moins de bavure.

En outre, l'abrasivité des tôles vis à vis d'un poinçon a fait l'objet d'une investigation plus approfondie, basée sur une simulation expérimentale du contact poinçon / tôle. Pour ce faire, un tribomètre « ouvert » a été développé et monté sur une ligne de découpe. Cette configuration nous a offert la possibilité de faire frotter un pion de la même nuance que le poinçon de découpe sur une tôle avant son découpage. Un premier test a été réalisé dans le but de vérifier la faisabilité de cette procédure de caractérisation. Les résultats obtenus permettent de valider le principe de mesure qui permet de tester les différentes configurations rencontrées lors du découpage de précision.

Chapitre 3

Méthodes de mesures de l'usure des poinçons et de la
quantité des bavures lors du découpage

Liste des figures et tableaux

Figure 3. 1: Corrélation entre l'évolution de l'usure et des bavures.....	84
Figure 3. 2: Presse utilisée lors des essais expérimentaux.....	86
Figure 3. 3: Les composantes de la ligne de découpage.....	86
Figure 3. 4: Schématisation de la géométrie de découpage.....	87
Figure 3. 5: Images optiques en 3D des arêtes coupantes des deux poinçons utilisés.....	89
Figure 3. 6: Système de lubrification par rouleaux (Système Raziol).....	91
Figure 3. 7: Géométrie d'un poinçon.....	95
Figure 3. 8: Positions d'acquisitions des images sur les poinçons avec le microscope InfiniteFocus®	95
Figure 3. 9: Exemples de mesures sur des profils d'un poinçon rectifié	96
Figure 3. 10: Extrémité du poinçon rectifié en fin d'essai (observé au microscope optique).....	96
Figure 3. 11: Profil d'usure final d'un poinçon rectifié	97
Figure 3. 12: Capteur optique Keyence LS-7010.....	97
Figure 3. 13: Comparaison des profils d'usure (optique / capteur Keyence).....	98
Figure 3. 14: Crayon optique STIL et son contrôleur.....	99
Figure 3. 15: mesure optique d'un profil usé d'un poinçon.....	99
Figure 3. 16 : Dispositif de mesure avec deux crayons optiques.....	100
Figure 3. 17: schématisation de la zone activée du poinçon.....	103
Figure 3. 18: Représentation schématique du montage d'activation du poinçon.....	103
Figure 3. 19: Spectre d'émission γ du tungstène après activation [Gréban 2006]	105
Figure 3. 20: Sonde de mesure de l'activité dans l'outil de découpe.....	105
Figure 3. 21: Rails de guidage du bloc sonde sur la plaque matrice de l'outil de découpe	106
Figure 3. 22: Spectre global d'énergie du poinçon activé.....	107
Figure 3. 23: Courbe d'étalonnage de l'activité relative en fonction de la perte d'épaisseur.	108
Figure 3. 24: Effet de la dilatation thermique de la presse sur l'activité mesurée du poinçon.	108
Figure 3. 25: Courbe de décroissance naturelle de l'activité des feuilles de tungstène.	109
Figure 3. 26: Protocole de réalisation d'une réplique du poinçon.....	110
Figure 3. 27: Bloc-cale pour mesure d'empreinte du poinçon	110
Figure 3. 28: Bloc-cale en position de prise d'empreinte du poinçon dans l'outil de découpage.....	111
Figure 3. 29: Bloc-cale après prise d'empreinte du poinçon.....	111
Figure 3. 30: La résine utilisée pour le moulage	111
Figure 3. 31: Photo de la réplique du poinçon H20S rectifié à 787 500 coups de presse	112
Figure 3. 32 : Images optiques du poinçon H20S rectifié et de sa réplique	113
Figure 3. 33 : Images optiques de l'arête du poinçon H20S rectifié et de sa réplique	113
Figure 3. 34: Les quatre zones de relevés des profils d'usure sur une réplique	114
Figure 3. 35: Exemple de profil d'usure de la réplique du poinçon à 550 000 coups de presse	114
Figure 3. 36: Comparaison de l'incertitude de la mesure par rapport aux variations naturelles de l'usure	115
Figure 3. 37: Faisabilité de la méthode de mesure par profilométrie	116
Figure 3. 38: Observation d'un bord découpé.....	118
Figure 3. 39: Image optique d'un bord découpé sur une tôle CuFe0.1P0.3 à 6 500 coups de presse.....	118
Figure 3. 40: Représentation d'un faciès de découpe.....	119
Figure 3. 41: Relevé topographique d'une bavure écrasée	120
Figure 3. 42: Marquage de la surface de la bavure.....	121
Figure 3. 43: Surface de la tôle découpée coté bavure.....	122
Figure 3. 44: Exemple d'un profil de bavure avec une déformation plastique.....	122
Figure 3. 45: Transformation de l'image topographique.	123
Figure 3. 46: Redressement autour du trou découpé par le plan des moindres carrés après création d'un masque	124
Figure 3. 47: Extraction de profils radiaux et création d'une image topographique redressée.....	124
Figure 3. 48: Redressement des profils.....	125
Figure 3. 49: Calcul du volume de la bavure.....	126
Figure 3. 50: Evolution du volume de bavure en fonction du nombre de profils.....	127
Figure 3. 51: Protocole de construction des profils retenus pour les calculs.....	128

<i>Tableau 3. 1 : Conditions inchangées des opérations de découpage.....</i>	<i>88</i>
<i>Tableau 3. 2 : Caractéristiques du carbure de tungstène H20S</i>	<i>89</i>
<i>Tableau 3. 3 : L'ensemble des tôles découpées.....</i>	<i>90</i>
<i>Tableau 3. 4 : Composition élémentaire et caractéristiques mécaniques des nuances testées</i>	<i>90</i>
<i>Tableau 3. 5 : Caractéristiques techniques des lubrifiants étudiés.....</i>	<i>91</i>
<i>Tableau 3. 6 : Matrice du 1^{er} essai de découpage.....</i>	<i>92</i>
<i>Tableau 3. 7 : Matrice du 2^{ème} essai de découpage.....</i>	<i>93</i>
<i>Tableau 3. 8 : Abondance isotopique du tungstène.....</i>	<i>104</i>
<i>Tableau 3. 9 : Principales réactions induites par l'activation et énergie</i>	<i>104</i>
<i>Tableau 3. 10 : Volume d'usure mesuré sur réplique et directement sur le poinçon.....</i>	<i>117</i>
<i>Tableau 3. 11 : Volume de la bavure ($\mu\text{m}^3 \times 10^6$) en fonction du nombre de profils</i>	<i>127</i>

3. Chapitre 3 : Méthodes de mesures de l'usure des poinçons et de la quantité des bavures lors du découpage

3.1. Introduction

L'objectif de ce travail étant la compréhension de l'évolution de l'usure des poinçons lors du découpage et sa relation avec la quantité de bavure sur les pièces découpées, et ce, en fonction de l'ensemble des paramètres du process, une étude expérimentale sur une presse industrielle était incontournable. Les essais sur presse permettent de se placer au plus près des conditions industrielles pour étudier l'usure des outils et la formation de bavures sur les bords découpés. Comme ces essais ont pour but de générer les données nécessaires pour mettre en évidence une relation entre l'usure des outils et la qualité des pièces découpées, il a donc fallu dans un premier temps identifier et valider les méthodes de mesures adéquates. En appréciant plus particulièrement la qualité des pièces découpées via le niveau de bavure, il était donc nécessaire de pouvoir le quantifier précisément (*figure 3.1*).

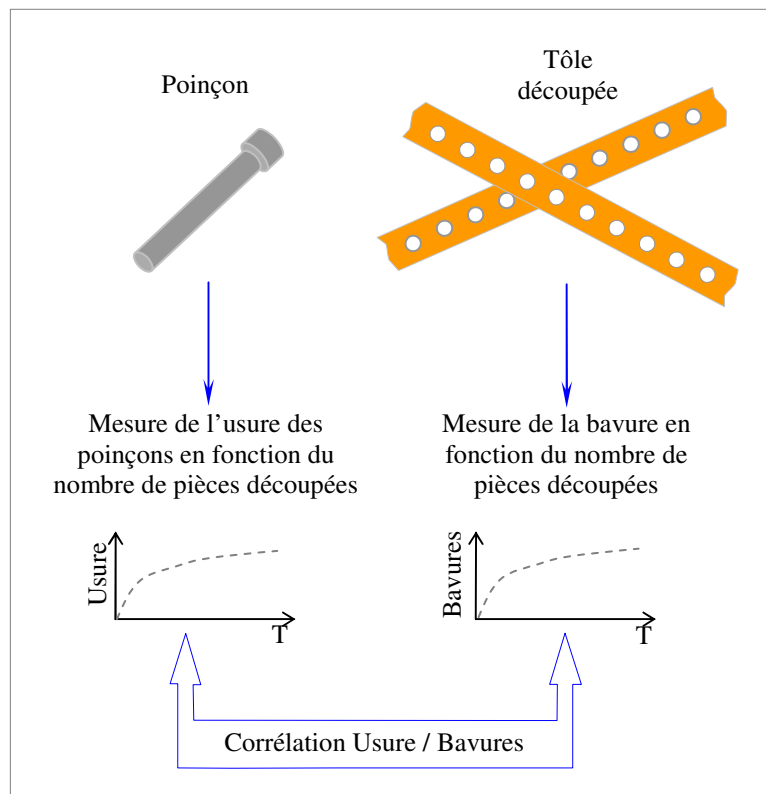


Figure 3. 1: Corrélation entre l'évolution de l'usure et des bavures

Ces mesures doivent permettre également de différencier des conditions opératoires du procédé avec une grande précision compte tenu des niveaux d'usure (quelques micromètres ou dizaines de micromètres pour des centaines de milliers de coups de presse) ainsi que des hauteurs de bavure attendus (quelques micromètres ou dizaines de micromètres également). Elles se doivent de plus de présenter une reproductibilité élevée compte tenu du nombre de paramètres influents. Dans ce chapitre seront donc présentées les différentes configurations testées ainsi que les méthodes de mesures retenues en vue de parvenir à l'objectif visé.

Dans le cas de l'usure du poinçon, nous allons classer les mesures effectuées pour le suivi de son évolution en deux catégories. Les premières méthodes qui seront abordées, dites mesures « ex situ », sont employées pour relever l'état des poinçons démontés, ce qui revient à faire une métrologie des poinçons avant et après chaque essai. La deuxième catégorie de méthodes de mesures appliquées au cours de la découpe sur presse est dite « in situ » donc sans démontage des poinçons. Cette précaution est prise pour ne pas altérer les conditions de découpe. La quantification de la bavure, quant à elle, est réalisée sur des échantillons de tôles découpées prélevés périodiquement. Une solution originale a été mise en place afin de quantifier le volume de bavure le long d'un bord découpé.

Il sera montré que ces méthodes permettent de mesurer l'influence de quelques paramètres du process sur l'évolution de l'usure au cours du temps ainsi que la qualité des pièces découpées. La mesure de l'usure ainsi que le prélèvement des échantillons de tôles découpées sont réalisés périodiquement en fonction du nombre de pièces découpées et des paramètres étudiés.

3.2. Essais de découpage sur presse

Pour atteindre les objectifs cités dans l'introduction, un plan d'expériences a été mis en place. Ce plan comporte des essais de découpage dans un environnement industriel. Pendant ces essais nous avons analysé différentes configurations. Ainsi, nous avons pu suivre l'évolution de l'usure des poinçons et l'accroissement de la quantité de bavure sur les pièces découpées. Ce paragraphe a pour but de décrire le déroulement des essais expérimentaux de découpe et les moyens employés.

3.2.1. Configuration des essais de découpage

Les essais de découpage ont été effectués sur une presse à inertie *BRUDERER* de 50 tonnes mise à notre disposition par la société *Diehl Augé Découpage*⁽³⁾ (figure 3.2). Cette presse constitue l'outil de recherche de la société. Elle fait partie d'une ligne de découpage traditionnelle équipée d'un dérouleur, d'un redresseur et d'un enrouleur (figure 3.3).



Figure 3. 2: Presse utilisée lors des essais expérimentaux



Figure 3. 3: Les composantes de la ligne de découpage

La cadence imposée est de l'ordre de 500 coups/min, soit une avance de la bande de tôle d'approximativement 150 mm/s. L'influence de ce paramètre ne sera pas incluse dans la

⁽³⁾ *Diehl Augé Découpage (Besançon)* est un fabricant de supports pour semi-conducteurs de puissance.

campagne d'essais pour l'évaluation de l'usure et de la quantité de la bavure. Donc il ne subira aucune variation lors de notre étude.

Les opérations de découpage sont réalisées sur des tôles en alliages de cuivre avec un outil progressif (voir chapitre 1). Pour les éléments qui constituent les outils de découpe, à savoir les poinçons et les matrices, notre choix s'est porté sur des éléments en carbure de tungstène. En effet, ces outils sont souvent utilisés dans l'industrie de découpage des composants électroniques en alliages de cuivre. Le carbure de tungstène qui est un matériau très dur sert à la confection d'outils devant résister à l'usure, comme c'est le cas dans le découpage. Il est principalement utilisé sous sa forme frittée à l'aide de cobalt, qui lui donne la ductilité nécessaire à sa résistance mécanique.

Pour les essais réalisés, le choix d'une géométrie de découpage cylindrique (forme axisymétrique) a été guidé par le fait que l'usure des poinçons va être uniforme sur leur contour. Cela permet d'assurer un suivi précis de l'évolution de l'usure en fonction du nombre de pièces découpées, et de traduire la quantité de matière perdue par usure en perte de cote des poinçons, supposée de ce fait avoir une répartition uniforme.

La figure 3.4 schématise la géométrie utilisée lors des essais de découpage. Parmi les principaux éléments qui entrent en jeu lors de la découpe, on trouve également le dévêtisseur. Celui-ci est également en carbure de tungstène.

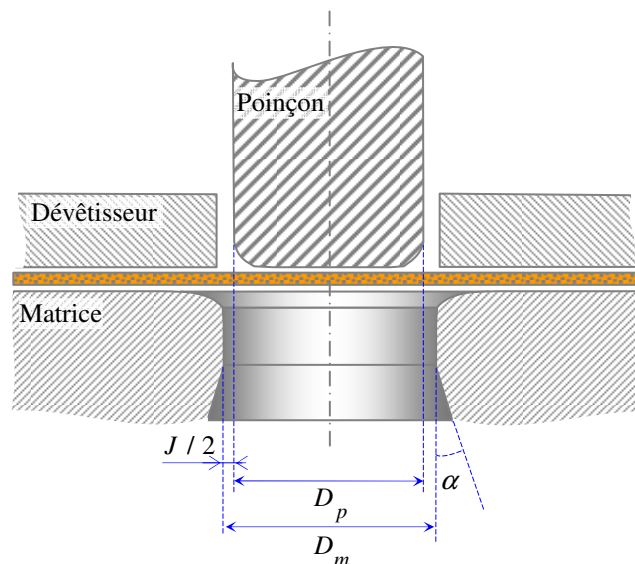


Figure 3. 4: Schématisation de la géométrie de découpage

A l'instar de la cadence, d'autres paramètres seront fixes et ne subiront aucune variation tout au long des essais expérimentaux. Ces paramètres sont listés dans le *tableau 3.1*.

Diamètre des poinçons	3.7 mm
Largeur des tôles	15 mm
Jeu poinçon / matrice	20 μ m
Jeu poinçon / dévêtitseur	20 μ m
Pas de progression de l'outil	4.5 mm
Course de la presse	19 mm

Tableau 3. 1 : Conditions inchangées des opérations de découpage

3.2.2. Paramètres étudiés

La campagne de découpage réalisée a pour but d'améliorer les performances dans le domaine de mise en forme par découpage. Cela est effectué essentiellement à travers l'étude de l'influence sur l'usure des poinçons et la qualité de découpe de plusieurs familles de paramètres :

- ↪ Etude de l'influence de la matière découpée,
- ↪ Etude de l'influence de la lubrification,
- ↪ Etude de l'influence du mode d'usinage des poinçons.

Le but étant d'identifier et d'évaluer les influences de ces différents paramètres intervenant lors d'une opération de découpage.

Ainsi, lors de l'analyse de l'influence de la matière découpée sur l'usure des poinçons et la qualité de découpe, les éléments étudiés sont:

- ↪ La composition des matières,
- ↪ La microstructure (taille de grains, précipités, ...),
- ↪ Le comportement mécanique (R_e , R_m , H_v , ...),
- ↪ L'épaisseur des tôles.

Quant à l'influence de la lubrification sur les performances en découpe, nous étudierons:

- ↪ La nature de l'huile,
- ↪ La quantité d'huile sur les tôles (grammage).

Concernant l'usinage des poinçons, deux modes d'obtention sont employés pour nos travaux, ils sont largement présents dans l'industrie du découpage:

- ↪ La rectification cylindrique,
- ↪ L'électroérosion par fil.

Afin d'optimiser le nombre de résultats que l'on pourra obtenir avec les essais de découpe, une matrice détaillant l'organisation du plan d'expérience a été établie.

3.2.3. Organisation de la campagne d'essais

L'étude des paramètres influant sur les performances en découpage a nécessité l'application d'un plan d'expériences prenant en compte les contraintes matérielles et celles du procédé intervenant lors de la découpe. Les essais expérimentaux ont été divisés en deux campagnes de découpage. Cette séparation est établie en fonction des deux poinçons utilisés pour réaliser les opérations de découpage. Les deux poinçons étudiés sont en carbure de tungstène dans la nuance H20S (*tableau 3.2*). Les deux modes d'usinage utilisés, à savoir la rectification cylindrique pour le premier poinçon et l'électroérosion par fil pour le deuxième poinçon, offrent des caractéristiques différentes pour les surfaces des parties coupantes des deux poinçons (*figure 3.5*). L'emploi de ces deux modes d'usinage a pour but d'identifier le lien entre la nature des perturbations générées par l'usinage sur les couches superficielles des poinçons et la quantité de matière perdue par usure suite au frottement sur les tôles découpées.

Composition chimique	Dureté	Densité Kg/dm ³	Propriétés
94 % WC + 6 % Co	1550 HV	14.90	- Extrêmement dur et résistant à l'usure - Taille des particules de carbure 1 à 2µm

Tableau 3. 2 : Caractéristiques du carbure de tungstène H20S

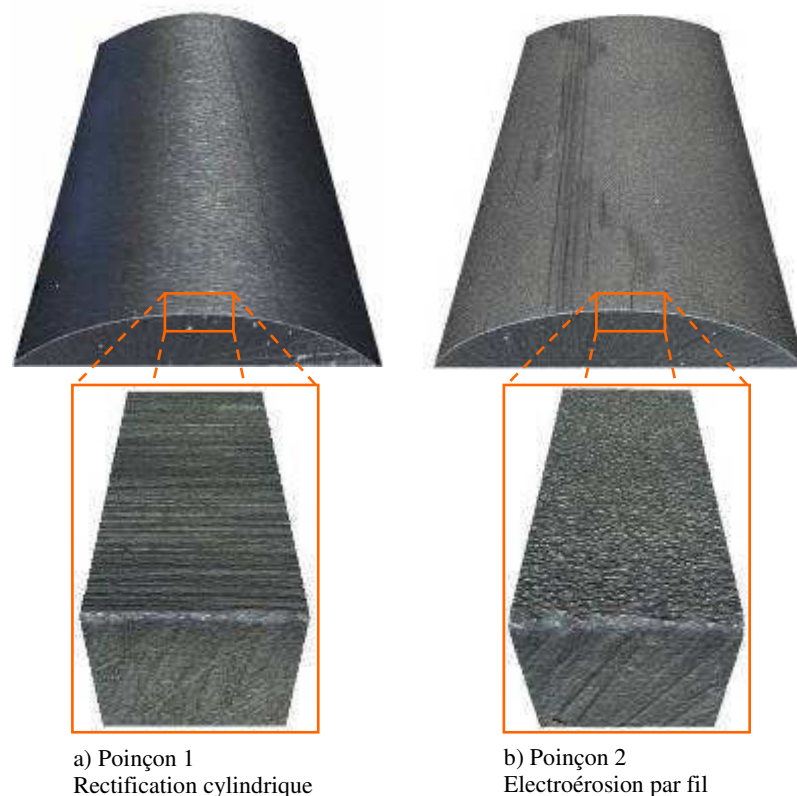


Figure 3. 5: Images optiques en 3D des arêtes coupantes des deux poinçons utilisés

Ainsi, deux campagnes d'essais ont été préparées pour les deux poinçons définis plus haut. Pour chaque poinçon employé, il a été possible de tester différents paramètres sur plus d'un million et demi de coups de presse (durée de vie théorique de chaque poinçon avant réaffûtage). De ce fait, nous avons établi une liste de tôles en alliages de cuivre parmi celles qui sont les plus utilisées dans le découpage de précision des composants électroniques. Ces tôles, décrites dans le deuxième chapitre, sont réparties sur les deux campagnes d'essais expérimentaux. Le *tableau 3.3* récapitule l'ensemble des nuances de tôles découpées lors des essais et citées dans le chapitre 2.

Nuances de tôles	Etat d'écrouissage	Epaisseur des tôles (mm)
CuFe0.1P0.03	H12	0.254 / 0.38 / 0.5 / 0.8
CuBe2	½H	0.25
CuBe2	prétraité	0.25
CuSn6	H12	0.2
CuSn3Zn9	H12	0.25
CuNi18Zn20	H12	0.2
CuNi3Si	H12	0.2
CuZn33	H12	0.25
CuAl	H12	0.25

Tableau 3. 3 : L'ensemble des tôles découpées

La composition élémentaire théorique (exprimée en pourcentage massique) des nuances découpées, et leurs caractéristiques mécaniques sont répertoriées dans le *tableau 3.4*.

Tôles	Module de Young (GPa)	Limite élastique 0.2 % (MPa)	Charge de rupture (MPa)	A (%)
CuFe0.1P0.03	121	375	355	10
CuNi18Zn20	102	224	370	20
CuSn6	91	400	500	20
CuNi3Si	140	660	720	7
CuZn33	100	360	430	22
CuAl	95	250	350	14
CuBe2 (½ H)	130	980	635	15
CuBe2 (prétraité)	138	1195	1350	4
CuSn32N9	112	440	510	15

Tableau 3. 4 : Composition élémentaire et caractéristiques mécaniques des nuances testées

Afin de compléter la liste des paramètres à étudier, une sélection de lubrifiants solubles a été opérée (*tableau 3.5*). La lubrification est le processus qui permet de diminuer le frottement et l'usure entre les surfaces des poinçons et des tôles découpées. Sous le terme lubrification interviennent en réalité au moins deux paramètres, la "qualité" ou nature du lubrifiant et sa quantité. Ainsi, pendant nos essais, nous nous proposons d'étudier et

d'analyser un certain nombre de lubrifiants utilisés dans le découpage, afin d'évaluer l'influence de la nature du lubrifiant dans les opérations de découpe. De plus, dans le cas du lubrifiant de référence la quantité de lubrifiant sera modifiée.

Nuance de lubrifiant	Type	Viscosité (mm ² /s à 40°C)	Masse volumique (g/l)
Huile 1	Huile minérale raffinée avec additif	8	850
Huile 2	Lubrifiant évanescent	1,5	790
Huile 3	Huile entière biodégradable d'origine végétale	47	920
Huile 4	Huile entière avec additif pour métaux non ferreux	31	893
Huile 5	Lubrifiant préparé à base d'huiles minérales sévèrement raffinées	15	905
Huile 6	Lubrifiant évanescent	4	782
Huile 7	Huile minérale raffinée avec additif	28	1000

Tableau 3. 5 : Caractéristiques techniques des lubrifiants étudiés

Le système de lubrification employé lors des essais utilise des rouleaux imbibés de lubrifiant (système Raziol, *figure 3.6*) afin de déposer l'huile sur les tôles découpées. La quantité de lubrifiant qui imbibe les rouleaux est fonction du nombre de coups de presse. Le système de lubrification fonctionne sur le principe du goutte à goutte, et la quantité d'huile est contrôlée par le nombre de coups de presse entre deux gouttes successives. Ainsi, en variant ce nombre de coups de presse, on varie la quantité de lubrifiant déposée sur les tôles.

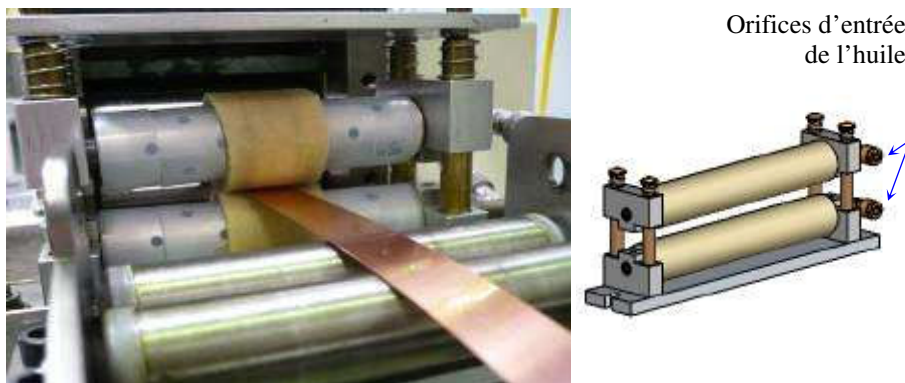


Figure 3. 6: Système de lubrification par rouleaux (Système Raziol)

La quantité d'huile déposée sur une tôle est alors contrôlée régulièrement par pesée. Périodiquement, on effectue un prélèvement d'un échantillon de tôle d'un mètre de longueur environ qui est pesé avant et après dégraissage à l'alcool dans un bain d'ultrasons.

Chacun des essais de découpage est fractionné en fonction des paramètres à étudier. A l'exception des paramètres lubrifiant et usinage des poinçons, pour lesquels on a estimé le nombre de coups de presse nécessaires à 100 000 et 200 000, le reste des paramètres est étudié sur 50 000 coups de presse pour mesurer leur influence sur l'usure et la qualité de découpe.

Durant le déroulement des essais on introduit régulièrement une configuration de référence. Ceci a pour but de contrôler que les modifications introduites lors des changements de paramètres d'essais pour réaliser l'ensemble des configurations du test n'ont pas altéré irréversiblement le procédé.

Les *tableaux 3.6 et 3.7* récapitulent les différentes configurations de découpage pour les deux essais expérimentaux effectués.

	Nombre de pièces découpées (x1000)		Configurations		
	Début	Fin	Paramètres étudiés	Tôles	Lubrifiants
Essai 1	0	750	Influence de la matière découpée (Mesure par activation superficielle)	CuFe0,1P0,03	Huile 1
	750	850	Faisabilité profilométrie empreinte	CuFe0,1P0,03	Huile 1
	850	1 100	Influence de la matière découpée	CuFe0,1P0,03	Huile 1
				CuSn6	Huile 1
				CuNi3Si	Huile 1
				CuNi18Zn20	Huile 1
	1 100	1 400	Influence de la quantité d'huile	CuFe0,1P0,03	Huile 1
	1 400	1 700	Influence de la nature du lubrifiant	CuFe0,1P0,03	Huile 1
					Huile 2
					Huile 3
					Huile 4

Tableau 3. 6 : Matrice du 1^{er} essai de découpage

	Nombre de pièces découpées (x1000)		Configurations		
	Début	Fin	Paramètres étudiés	Tôles	Lubrifiants
Essai 2	0	200	Influence de l'usinage du poinçon / Essai de référence	CuFe0,1P0,03 (0.254)	Huile 1
	200	350	Influence de l'épaisseur des tôles découpées	CuFe0,1P0,03 (0.38)	Huile 1
				CuFe0,1P0,03 (0.5)	
				CuFe0,1P0,03 (0.8)	
	350	450	Influence de la nature du lubrifiant	CuFe0,1P0,03 (0.254)	Huile 5
	450	550	Essai de référence	CuFe0,1P0,03 (0.254)	Huile 1
	550	754	Influence de la matière découpée	CuZn33 (0.25)	Huile 1
				Cua1 (0.25)	
				CuBe2 (1) (0.25)	
				CuBe2 (2) (0.25)	
	754	804	Essai de référence	CuFe0,1P0,03 (0.254)	Huile 1
	804	854	Influence de la matière découpée	CuSn32N9 (0.25)	Huile 1
	854	1154	Influence de la nature du lubrifiant	CuFe0,1P0,03 (0.254)	Huile 5
					Huile 6
					Huile 7
	1154	1254	Essai de référence	CuFe0,1P0,03 (0.254)	Huile 1
	1254	1304	Influence de l'épaisseur des tôles découpées	CuFe0,1P0,03 (0.8)	Huile 1
	1304	1334	Influence de la matière découpée	Cua1 (0.25)	Huile 1

Tableau 3. 7 : Matrice du 2^{ème} essai de découpage

3.3. Mesure de l'usure

Le suivi de l'usure sur les outils de découpage constitue un objectif ultime pour nos essais. Les mesures ont été effectuées lors d'essais d'endurance des poinçons. La détermination de l'usure passe par des mesures très précises tout au long de la découpe. La principale contrainte à laquelle répondent ces mesures est le non démontage des poinçons de l'outil de découpe. Ces travaux sont basés sur une méthode de mesure de l'usure mise au point au cours des travaux de Gréban [Gréban 2006]. En outre, d'autres méthodes de mesure

et de suivi ont été développées dans une phase préparatoire à notre étude. Cela permettra d'accéder aux changements géométriques subis par les poinçons et les modifications engendrées sur les profils de découpe en fonction du nombre de pièces découpées. Par ailleurs, les poinçons ont subi une métrologie révélant leur état géométrique avant le début des essais. Ces méthodes seront exposées ici en faisant la distinction entre deux types de mesures : d'une part les méthodes "ex situ" employées pour la caractérisation du poinçon en dehors de la presse de découpage, et d'autre part les méthodes et techniques "in situ" de suivi de l'usure sur les poinçons montés dans l'outil de découpe.

3.3.1. Mesures Ex situ

Le suivi de l'usure d'un poinçon pendant un essai de découpage passe par la détermination de son état géométrique en début de l'essai. Cela est possible en réalisant une métrologie afin de caractériser la géométrie initiale du poinçon. Toutefois, il est aussi nécessaire d'effectuer une métrologie de contrôle à la fin des essais d'endurance du poinçon. Ce contrôle permet de vérifier l'état d'usure finale sur le poinçon. Ces mesures, effectuées lorsque le poinçon est démonté, sont réalisées principalement avec le microscope optique *InfiniteFocus*®. Il génère des acquisitions en 3 dimensions permettant d'observer les arêtes coupantes des poinçons et de relever leurs profils d'usure.

D'autres méthodes de métrologie ont été testées. Il s'agit de mesures avec des capteurs à faisceau optique. Ils permettent de réaliser des mesures sur la totalité de la zone active des poinçons et ainsi relever les profils d'usure sur les arêtes de coupe.

3.3.1.1. Mesure optique du profil des arêtes de découpe des poinçons

Les possibilités offertes par la topomicroscopie optique avec le microscope *InfiniteFocus*®, présenté dans le chapitre 2, nous permettent de caractériser les poinçons utilisés lors de nos essais de découpage sans contact et avec précision. Ce microscope permet l'examen des formes géométriques et des contours des poinçons (*figure 3.7*).

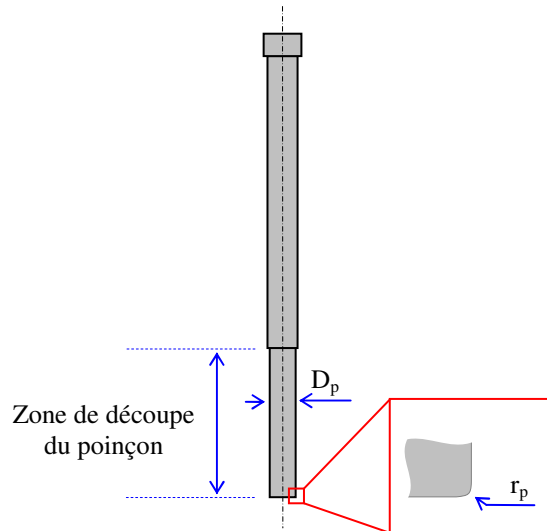


Figure 3. 7: Géométrie d'un poinçon

Des acquisitions en 3D ont été réalisées sur les poinçons. Suivant les mesures souhaitées les poinçons sont posés à plat sur la platine du microscope, ou à 45° (figure 3.8).

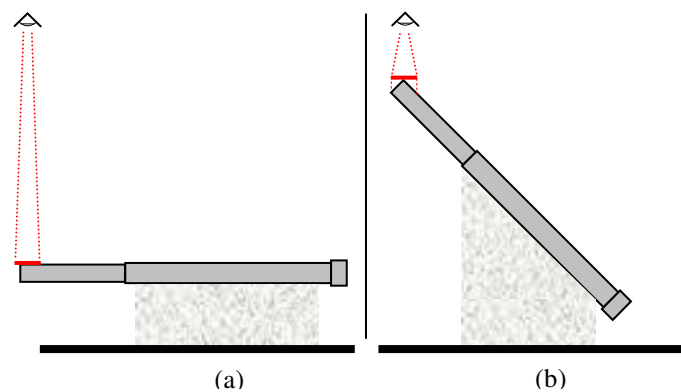


Figure 3. 8: Positions d'acquisitions des images sur les poinçons avec le microscope InfiniteFocus®

Par la suite une métrologie 3D a été réalisée sur les deux poinçons en carbure de tungstène utilisés. Une fois les images acquises, un traitement est réalisé avec le logiciel du microscope. On relève des profils sur les images permettant de mesurer principalement, r_p , le rayon des arêtes des poinçons et, D_p , le diamètre des poinçons dans la zone active ou de découpe (figure 3.9).

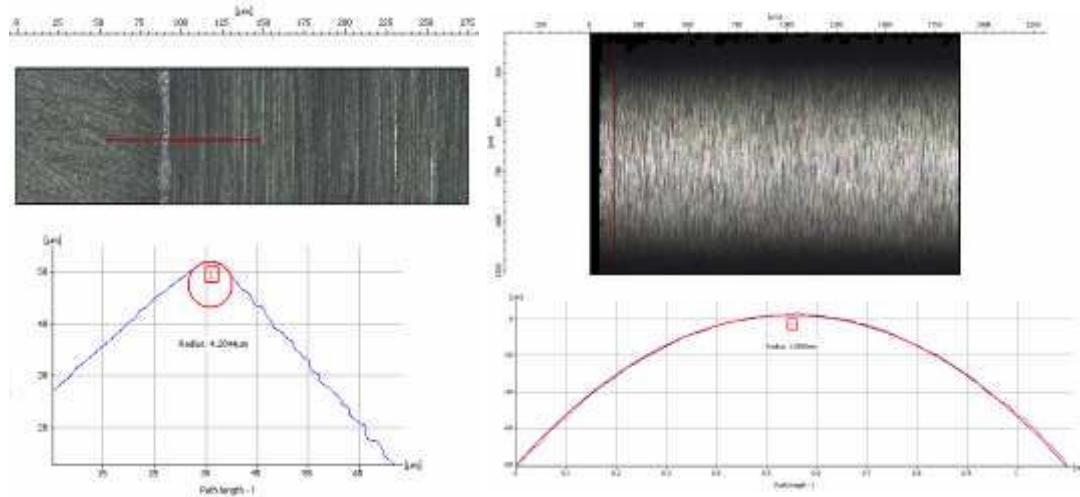


Figure 3. 9: Exemples de mesures sur des profils d'un poinçon rectifié

Les mêmes mesures sont réalisées sur les poinçons une fois les essais de découpage terminés. Des relevés de profils sur les bords découpants des poinçons permettent d'évaluer la géométrie d'usure finale (*figures 3.10 et 3.11*).

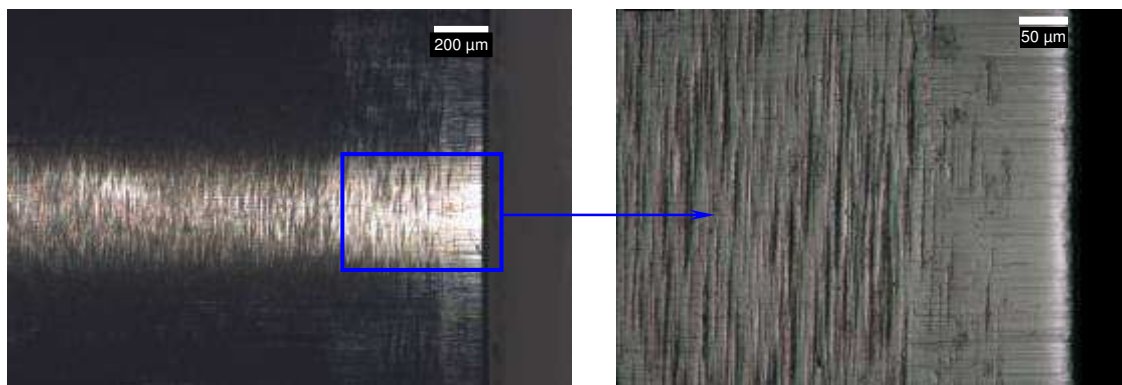


Figure 3. 10: Extrémité du poinçon rectifié en fin d'essai (observé au microscope optique)

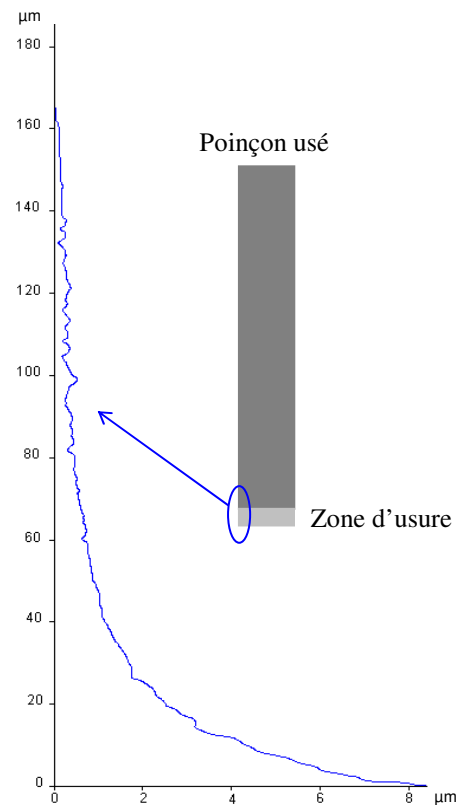


Figure 3. 11: Profil d'usure final d'un poinçon rectifié

En associant une équation à la courbe décrivant le profil d'usure, par exemple il sera possible par intégration sur le contour du poinçon, d'estimer le volume de matière perdue par usure.

3.3.1.2. Mesure du profil d'usure : capteur optique à ombroscopie (Keyence®)

Dans le même esprit que la méthode présentée plus haut, nous avons cherché à relever les profils d'usure des poinçons avec un capteur optique par ombroscopie. Ce capteur Keyence® porte la référence LS 7010 et il est couplé à un contrôleur de référence LS 7601 avec visualisation de la cible (figure 3.12).



Figure 3. 12: Capteur optique Keyence LS-7010

La mesure se fait par exposition continue du poinçon (diamètre 3.7mm) à un faisceau optique de largeur 6mm. La tête de mesure est équipée d'une caméra qui capture l'image de la zone de mesure sur le poinçon. La visualisation de celle-ci en temps réel permet d'ajuster facilement la position de mesure. Ainsi, nous obtenons des estimations en continu du diamètre extérieur du poinçon, à différents points de mesures. Ces valeurs sont affichées numériquement sur le contrôleur. L'épaisseur du faisceau laser émis par la source, bien que la plus faible sur le marché, est de 10 μ m. De ce fait, sa réponse intègre cette distance le long du profil du poinçon lorsqu'on le fait défiler devant le faisceau, filtrant par-là même sa réponse. Mais le handicap le plus important de cette large zone d'intégration est mis en évidence à l'extrémité du poinçon. En effet, le profil d'usure en fin d'essai de découpage présente des variations significatives sur le rayon de l'arête de découpe dans les premiers micromètres de la hauteur du poinçon (*figure 3.13*).

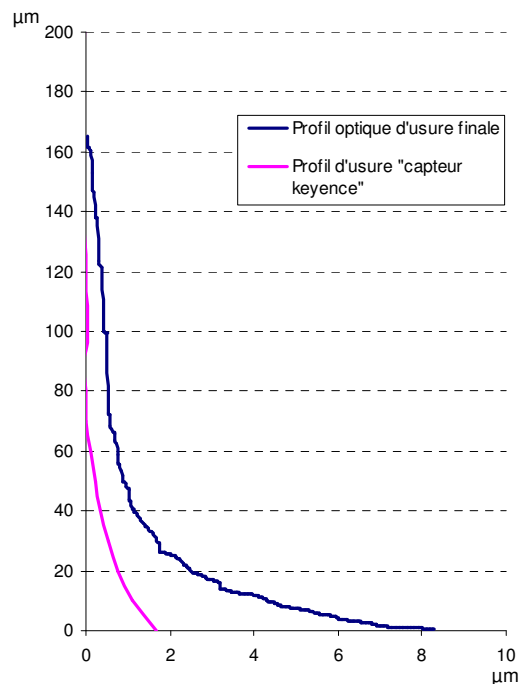


Figure 3. 13: Comparaison des profils d'usure (optique / capteur Keyence)

On constate nettement que plus l'épaisseur du faisceau sort du poinçon moins la cote réelle du poinçon est atteinte. Ce type de mesure ne peut donc être utilisé en l'état.

3.3.1.3. Mesure du profil d'usure : capteur optique ponctuel (STIL®)

Une autre technologie optique a été testée. Il s'agit d'un capteur de mesure dimensionnelle fabriqué par STIL (référence CL1 MG210) (*figure 3.14*).



Figure 3.14: Crayon optique STIL et son contrôleur

Cette mesure par crayon optique est fondée sur l'imagerie confocale chromatique. La surface à analyser est placée dans une zone d'altitude précise (appelée zone de codage chromatique) où elle diffuse le pinceau de lumière incidente. La lumière retrodiffusée traverse l'objectif chromatique du crayon dans le sens inverse et arrive sur un trou qui filtre toutes les longueurs d'onde sauf celle qui est focalisée. La lumière collectée est analysée par un spectrographe. La position de la surface mesurée est en relation directe avec la longueur d'onde détectée.

La saisie du profil du poinçon (*figure 3.15*) s'effectue selon un procédé de balayage appliqué le long de son axe. Son diamètre et sa longueur sont mesurés simultanément, garantissant la saisie précise des points de mesure des diamètres et de la géométrie de la surface du poinçon.

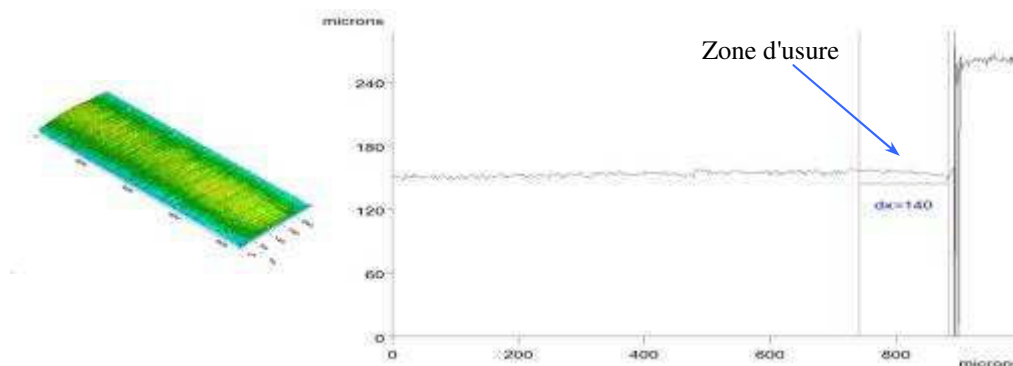


Figure 3.15: mesure optique d'un profil usé d'un poinçon

Par ailleurs, cette analyse nous permet d'accéder à l'état d'usure des poinçons avec une précision satisfaisante. Effectivement, le diamètre du spot du crayon optique est de $2\text{ }\mu\text{m}$, ce qui permet de réaliser des mesures tout le long d'un profil suivant l'axe du poinçon avec cette fois une "épaisseur" d'intégration réduite.

Ces tests de mesures ont été effectués sur un poinçon en laboratoire, loin de l'environnement et des contraintes industrielles. Néanmoins ce système de mesure offre la possibilité d'effectuer des mesures de l'usure d'un poinçon "in situ" et donc sans démontage de celui-ci. Dans cette optique, un banc de mesure a été conçu afin de tester une configuration qui offre la possibilité de construire des images précises en 3D de la morphologie de la zone de découpe des poinçons. Sur ce banc de mesure on prévoit l'utilisation de deux crayons optiques en opposition. Ce mode de mesure permettra de simplifier la cartographie de la zone d'usure sur un poinçon (*figure 3.16*).

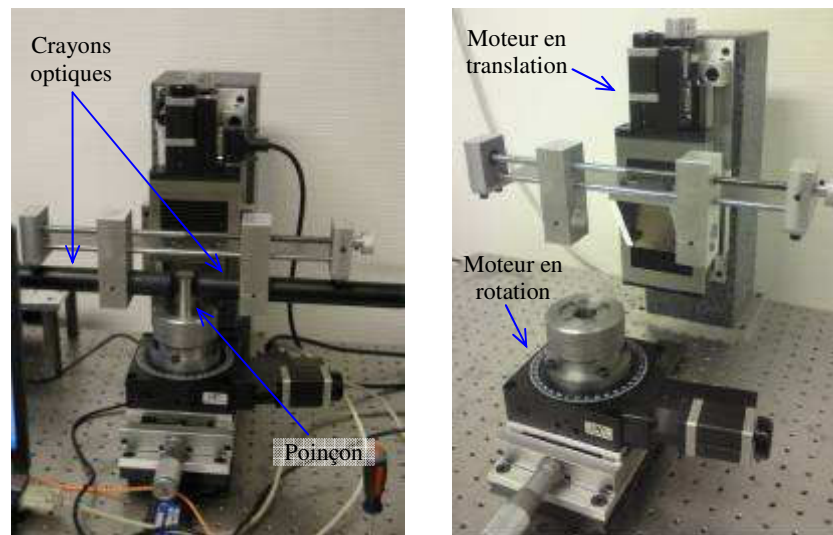


Figure 3. 16 : Dispositif de mesure avec deux crayons optiques

A terme, une fois le principe de mesure validé, on envisage son implantation dans un outil de découpage sur une presse industrielle.

3.3.2. Mesures In situ

On a vu précédemment qu'il est nécessaire de pouvoir mesurer l'état d'usure des poinçons au cours de l'avancement des opérations de découpe afin de suivre l'évolution de leur géométrie et par conséquent pouvoir la confronter à la qualité des pièces produites.

L'estimation en temps réel de l'usure des outils de découpe est également très importante pour prévoir les maintenances d'outils ; remplacement ou affûtage. De plus, l'usure des éléments de découpe étant réduite cela nécessite d'être en capacité de la mesurer précisément. Traditionnellement, l'usure d'un poinçon dans un outil de découpe est mesurée soit indirectement par l'évolution du profil de la pièce découpée [Myo Hla 2003], soit directement par profilométrie du poinçon ([Faura 1996], [Maeda 1974], [Luo 1997], [Luo 1999]). Cependant, ces méthodes de mesure ont respectivement comme inconvénients de nécessiter soit la préparation et l'observation d'un grand nombre de pièces, soit le démontage de l'outil. Or, le centrage du jeu poinçon / matrice, qui influence fortement la cinétique d'usure, ne peut être garanti à chaque remontage de l'outil. En effet, un décentrage de quelques micromètres sur le jeu poinçon / matrice modifie considérablement les conditions de découpe [Meunier 2005].

Le travail présenté ici a pour but de décrire la mise en œuvre de techniques de mesures de l'usure d'un poinçon de découpe in situ dans la presse de découpe sans aucun démontage de l'outil. Pour ce faire, la première méthode retenue est l'activation superficielle appliquée ici à des outils de découpe. Cette technique, citée dans le premier chapitre, a été employée par Gréban lors de son étude de la découabilité des alliages de cuivre. Cette méthode a été adaptée et ajustée pour les besoins et les contraintes des opérations de découpe. Devant les résultats satisfaisants issus de cette technique et la précision obtenue, la technique d'activation a été reconduite comme méthode de mesure de référence de l'usure des poinçons de découpe lors de nos essais.

En outre, parallèlement au suivi de l'usure par activation superficielle, nous avons mis en place une autre technique dite par réplique pour nous permettre d'obtenir les profils intermédiaires d'usure et ainsi accéder au volume d'usure d'une autre manière. La mise en œuvre et l'application de cette méthode ont fait l'objet d'une adaptation aux contraintes de l'outil de découpage industriel.

3.3.2.1. Mesure de l'usure par activation superficielle

La technique de l'activation superficielle (Radiotraceur) est un moyen original pour la mesure de l'usure des matériaux des surfaces frottantes. Elle permet l'évaluation et le suivi en direct de la quantité de particules perdue par usure.

Cette technique de mesure a été développée par [Conlon 1974] et a été utilisée à de nombreuses reprises dans différents secteurs industriels (automobile, aéronautique) ([Natter

1987], [Jeanneau 1981], [Atom 1980], [Askouri 1975]). Cependant, cette technique a été utilisée pour la première fois dans le secteur du découpage par Gréban [Gréban 2006].

Cette méthode consiste à soumettre une surface présélectionnée d'une pièce à une activation par un faisceau de particules. Celle-ci est faite de telle sorte qu'elle ne modifie pas les propriétés mécaniques du matériau de la pièce. Une couche mince de la zone présélectionnée de la pièce est d'abord irradiée avec un faisceau de particules. Cette irradiation provoque dans une partie des atomes constituant le matériau activé une transmutation et le passage de ceux-ci dans un état excité. Lors de leur désexcitation, il y a une émission de rayonnement qui est mesurée et dont l'intensité est liée au nombre d'atomes excités.

Les contraintes de cette technique sont assez nombreuses et ne permettent pas de travailler dans toutes les situations. En effet, le matériau activé ne doit pas émettre de rayonnement dangereux pour l'homme et sa période de demi-vie doit être suffisamment longue afin que la décroissance d'activité naturelle soit faible devant la perte d'activité par usure.

Enfin une autre contrainte est que l'activité totale doit être inférieure au seuil au-delà duquel des dispositifs spécifiques de protection doivent être employés. Dans un tel cas en effet il serait difficile de l'utiliser dans un environnement industriel.

Une fois la pièce activée et installée, un équipement de mesure spécifique permet de détecter les rayons émis par l'activité induite. Au cours du processus d'usure une perte de matière dans la zone marquée conduit à la diminution de l'activité de la pièce. Celle-ci est mesurée de façon très précise en positionnant un photodétecteur près de la zone activée. Ainsi, il devient possible de mesurer la décroissance de l'activité du poinçon qui est liée à la perte de matière de la surface activée par usure et à la décroissance naturelle de l'activité.

a) Application de la méthode au découpage

Dans ce cas précis l'activation n'est réalisée que sur la partie active des poinçons, autrement dit, l'arête de découpe et la zone en contact avec les tôles découpées. Cette limitation de la zone activée est rendue nécessaire par la volonté de réduire l'activité du poinçon d'une part et afin d'augmenter au maximum la précision des mesures d'autre part, car la précision de la méthode réside dans cette activation sélective du poinçon. En effet il est nécessaire que la perte d'activité due à l'usure soit importante par rapport à l'activité initiale afin d'obtenir la meilleure précision possible. Il a été décidé d'activer sélectivement le

poinçon sur 100 μm de hauteur et 100 μm de profondeur (activité homogène sur les 25 premiers micromètres de profondeur et décroissante avec la profondeur sur les derniers 75 μm), comme l'illustre la figure 3.16. Gréban a défini les limites d'activation après avoir observé la profondeur d'usure maximum ainsi que la répartition de celle-ci sur le contour d'un poinçon usé après un million de coups de presse.

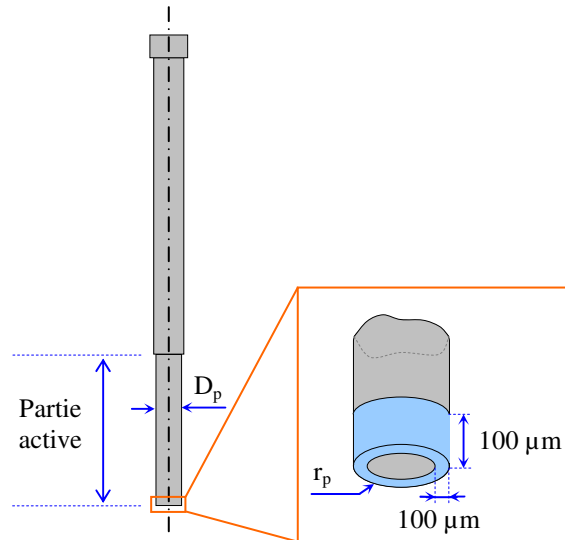


Figure 3. 17: schématisation de la zone activée du poinçon

Le poinçon a été choisi de forme cylindrique afin que l'usure soit uniforme sur la partie active de l'outil et permettre ainsi d'obtenir un résultat quantitatif sous la forme d'un volume ou encore d'une profondeur d'usure. Pour réaliser de manière concrète une telle activation sélective d'une zone très petite sur le poinçon, il a été nécessaire de réaliser un cache spécifique ainsi qu'un montage permettant de procéder à une activation homogène sur le contour complet du poinçon (figure3.17).

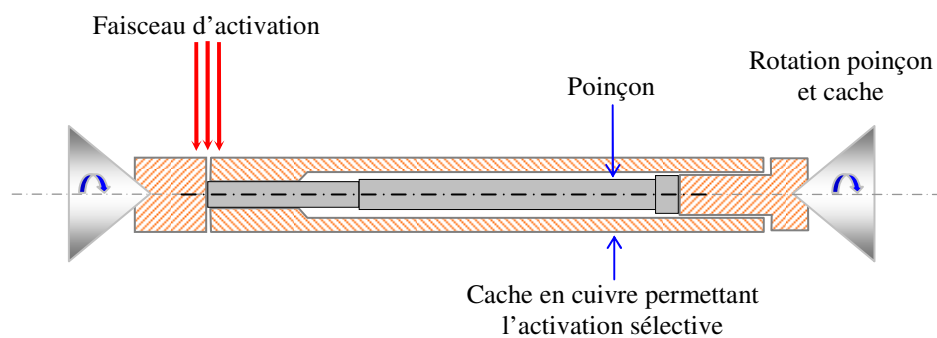


Figure 3. 18: Représentation schématique du montage d'activation du poinçon

L'activation du poinçon en carbure de tungstène est obtenue par l'exposition à un faisceau de deutons. Le tungstène est alors transmuté en différentes espèces selon leur abondance isotopique (*tableau 3.8*).

Isotope	Abondance isotopique (%)
^{180}W	0.12
^{182}W	26.5
^{183}W	14.3
^{184}W	30.6
^{186}W	28.4

Tableau 3. 8 : Abondance isotopique du tungstène

Gréban précise que le choix de l'élément tungstène provient des possibilités de transmutations plus importantes que pour le carbone ainsi que de la plus grande maîtrise des faisceaux d'activation nécessaires. Les principales réactions d'activation sont données dans le *tableau 3.8*. La bande d'énergie la plus intéressante du spectre d'émission gamma résultant est située entre 80 et 200 KeV (*figure 3.18*), où deux pics caractéristiques se distinguent, le pic à 111 KeV du ^{184}Re de demi-vie 38 jours et le pic à 160 KeV du ^{183}Re de demi-vie 70 jours (*tableau 3.9*). Sur le spectre de la *figure 3.18*, d'autres pics de courtes demi-vies apparaissent (2.7 et 3.8 jours). Ces pics perturbent la mesure d'activité, cependant, ils disparaissent au bout de quelques semaines après l'activation.

Réaction d'activation	Energie (KeV)	Demi-vie (Jours)
$^{182}\text{W} (d,2n) ^{182}\text{Re}$		2,7
$^{183}\text{W} (d,2n) ^{183}\text{Re}$	162	70
$^{184}\text{W} (d,2n) ^{184}\text{Re}$	111	38
$^{186}\text{W} (d,2n) ^{186}\text{Re}$		3,8

Tableau 3. 9 : Principales réactions induites par l'activation et énergie des photons γ et demi-vie des isotopes formés [Gréban 2006]

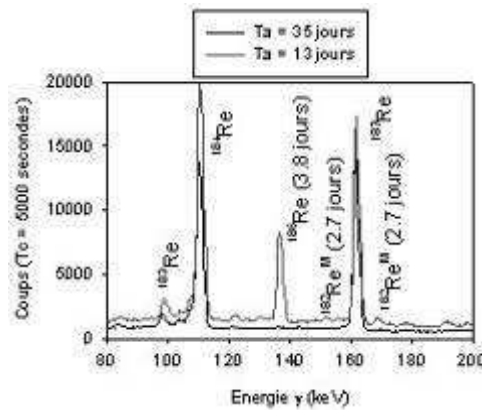


Figure 3. 19: Spectre d'émission γ du tungstène après activation [Gréban 2006]

b) Principe de la mesure de l'usure

L'évolution de l'usure du poinçon en fonction du nombre de coups de presse a été évaluée avec des mesures périodiques de l'activité (tous les 12 500 coups de presse). Une sonde de mesure est utilisée afin de mesurer le niveau d'activité résiduelle sur le poinçon (figure 3.20).

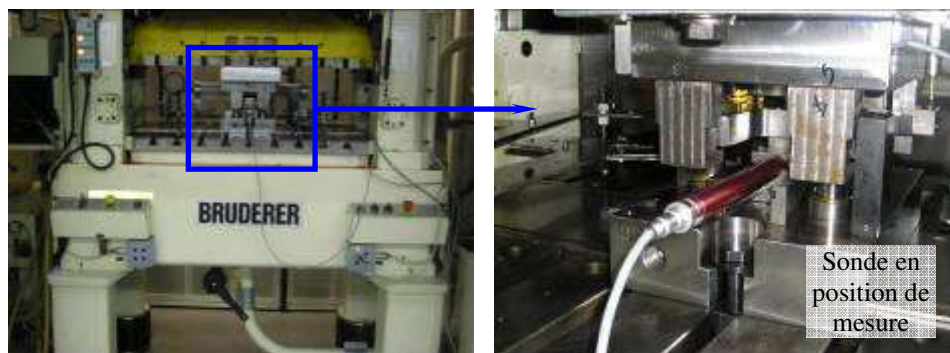


Figure 3. 20: Sonde de mesure de l'activité dans l'outil de découpe

Les dimensions réduites de l'outil utilisé ainsi que de la zone activée sur celui-ci associées aux faibles niveaux d'activité initiale du poinçon et de la perte d'activité liée à l'usure rendent plus que nécessaire un parfait positionnement du détecteur en face de la zone irradiée.

Celui-ci doit en effet être placé aussi près que possible puisque l'intensité mesurée diminue avec le carré de la distance source / détecteur. À chaque mesure, la presse est arrêtée et la sonde est mise en place sous l'outil ; il faut donc assurer un repositionnement de celle-ci aussi précis que possible.

Pour ce faire, deux rails de guidage sont placés dans l'outil sur la plaque matrice (*figure 3.21*). Ces rails permettent de positionner précisément un bloc en acier dans lequel se trouve la sonde de mesure. Ce bloc-cale est placé sur la plaque matrice après ouverture de l'outil. La fermeture de l'outil sur le bloc-cale permet de comprimer les ressorts du dévêtisseur et ainsi de positionner le poinçon à 0.2mm de la sonde de mesure (*figure 3.20*). L'incertitude du positionnement du poinçon ($\pm 2\sigma$) par rapport à la sonde a été mesurée et est égale à $7\mu\text{m}$ soit une erreur sur la mesure d'activité de 0.2%.

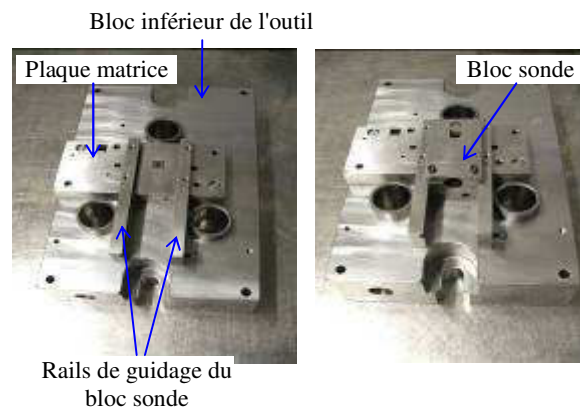


Figure 3. 21: Rails de guidage du bloc sonde sur la plaque matrice de l'outil de découpe

Par la suite, des corrections sont apportées afin d'obtenir la quantité d'usure sur le poinçon. La première correction concerne la distance poinçon / sonde, qui est modifiée par la dilatation thermique de la presse. Un capteur de déplacement est employé afin de contrôler cette distance.

La deuxième correction apportée concerne la perte naturelle de l'activité sur le poinçon. Une courbe d'étalonnage est identifiée afin d'appliquer les corrections nécessaires à la valeur d'usure du poinçon.

c) Calibration et quantification de la mesure in situ de l'usure

c.1) Mesure de l'activité

La sonde utilisée pour la mesure de l'activité est un détecteur de type CdTe (diamètre 16mm). Les résultats ont été obtenus par la mesure de l'intensité du pic à 111 ou 160 keV. Afin de réduire l'incertitude d'une telle mesure, nous avons alors opté pour une mesure de l'intensité totale du spectre complet entre 40 et 200 keV. Cette mesure intègre les pics

particuliers à 111 et 160 keV mais également la partie du spectre correspondant à la fluorescence X (*figure 3.22*). Cette fluorescence se manifeste par un pic plus large observé pour les faibles énergies (environ 50 keV). La mesure de l'intensité sur tout le spectre a permis de réduire l'incertitude de mesure (écart type de 0,5 coups/sec) mais rend le signal recueilli beaucoup plus sensible au bruit à cause de l'intégration de la fluorescence X qui peut provenir d'interactions secondaires.

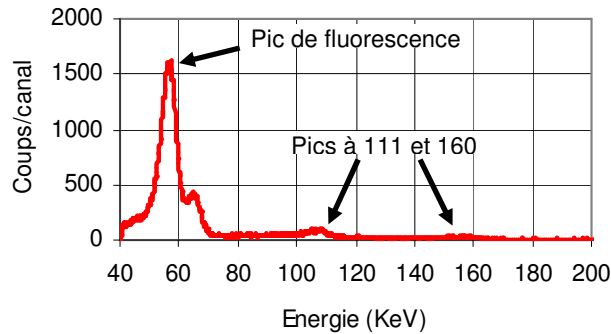


Figure 3. 22: Spectre global d'énergie du poinçon activé.

c.2) Etalonnage perte d'activité / volume d'usure

Pour permettre de convertir la perte d'activité mesurée sur le poinçon en volume de matière usée, il est nécessaire de réaliser au préalable un étalonnage. Celui-ci a pour but de déterminer la relation entre la perte d'activité du poinçon et le volume de matière perdue.

En conséquence, parallèlement à l'activation du poinçon, un empilement de feuilles de tungstène de 6 μm d'épaisseur a été activé dans les mêmes conditions. Une mesure de l'activité de l'empilement des feuilles permet, en faisant varier le nombre de feuilles, d'obtenir une courbe de l'activité relative en fonction de l'épaisseur de tungstène (*figure 3.23*). Cette courbe permet d'étalonner la perte d'activité du poinçon en fonction de la quantité de matière perdue par usure, en supposant en première approximation que la courbe relative au tungstène est équivalente à celle du carbure de tungstène du poinçon.

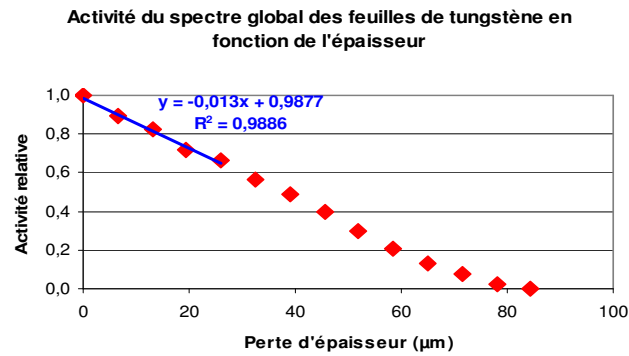


Figure 3. 23: Courbe d'étalonnage de l'activité relative en fonction de la perte d'épaisseur.

Une autre variable intrinsèque au procédé lui-même est la variation de la distance détecteur/source associée aux phénomènes de dilatation thermique. En effet l'utilisation de la presse de découpe entraîne son échauffement et sa dilatation. Un capteur de déplacement est placé entre la plaque porte-poinçon et le dévêtitseur, permettant de mesurer l'effet de la dilatation thermique de la presse en position de mesure de l'activité. Celle-ci se traduit par une variation de 30 μm au maximum de la distance entre le poinçon et la sonde de mesure. Une courbe de l'effet de la distance poinçon/sonde sur l'activité mesurée est tracée (figure 3.24), permettant de corriger l'effet de la dilatation thermique sur la mesure d'activité.

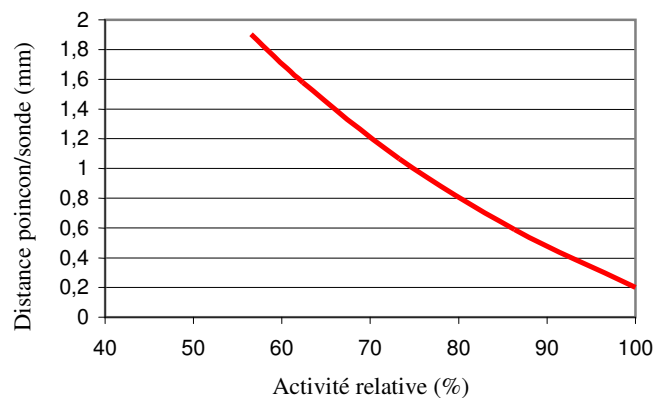


Figure 3. 24: Effet de la dilatation thermique de la presse sur l'activité mesurée du poinçon.

Il reste enfin à corriger les mesures d'activité du poinçon avec la décroissance naturelle de l'activité de celui-ci en fonction du temps.

Pour un élément activé, l'activité décroît naturellement en fonction du temps selon une courbe exponentielle. Pendant toute la durée des essais, des mesures régulières de l'activité des feuilles de tungstène sont réalisées. La courbe de décroissance relative de l'activité des

feuilles de tungstène obtenue (figure 3.24) permet de corriger exactement la perte d'activité naturelle du poinçon.

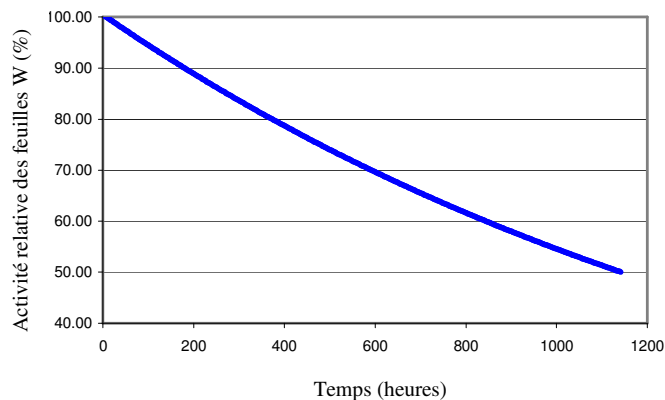


Figure 3. 25: Courbe de décroissance naturelle de l'activité des feuilles de tungstène.

3.3.2.2. Mesure d'usure par profilométrie sur réplique du poinçon

La technique employée pour obtenir des répliques des poinçons est la duplication par moulage au silicone. Ce type de duplication permet de disposer en quelques heures d'une réplique des poinçons par moulage. Le poinçon à dupliquer est immergé dans un bloc, appelé « bloc moule », rempli de silicone. On prend soin au préalable de positionner ce dispositif, qui nous permettra de prendre l'empreinte du poinçon, dans l'outil de découpe, sous le poinçon à l'aide d'un système avec des rails. Une butée vient assurer la mise en position du « bloc moule » centré par rapport à la position du poinçon dans l'outil de découpe.

Le silicone utilisé est une matière souple permettant de réaliser des formes compliquées et de s'affranchir le plus souvent des contre dépouilles. Les détails reproduits peuvent être d'une très grande finesse. Cela nous permettra d'obtenir des profils intermédiaires de l'usure des poinçons au cours de la découpe.

La méthode de relevé d'usure d'un poinçon par réplique est une méthode que nous avons développée spécialement pendant nos travaux. Lors de ces essais la méthode est adaptée aux contraintes de mesure sur un outil industriel. Cette méthode de mesure d'usure par profilométrie se décompose en trois grandes étapes (*figure 3.26*) :

- ↪ Prise d'empreinte du poinçon dans l'outil de découpe (sans démontage)
- ↪ Réalisation d'une réplique du poinçon
- ↪ Mesure par profilométrie des arêtes de la réplique et calcul du volume d'usure.

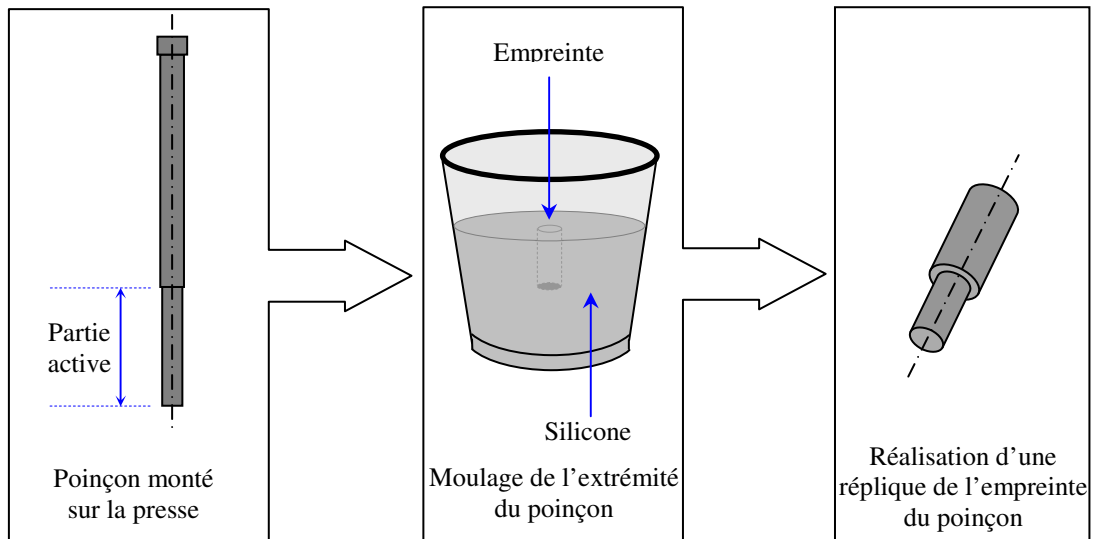


Figure 3. 26: Protocole de réalisation d'une réplique du poinçon

a) Méthodologie de la prise d'empreinte du poinçon

Pour effectuer l'empreinte du poinçon, on utilise le même principe que pour l'activation superficielle pour que l'extrémité du poinçon soit accessible à la mesure. Un bloc-cale (figure 3.27) a été usiné dans lequel un récipient peut contenir un volume de résine.



Figure 3. 27: Bloc-cale pour mesure d'empreinte du poinçon

Le bloc-cale positionné sur la plaque matrice de l'outil permet de comprimer les ressorts du dévêtitseur et ainsi extraire l'extrémité du poinçon pour que celui-ci baigne dans la résine (figures 3.28 et 3.29). Le temps de durcissement de la résine est de l'ordre de quelques minutes. On peut alors réaliser une empreinte du poinçon sans démontage de l'outil.

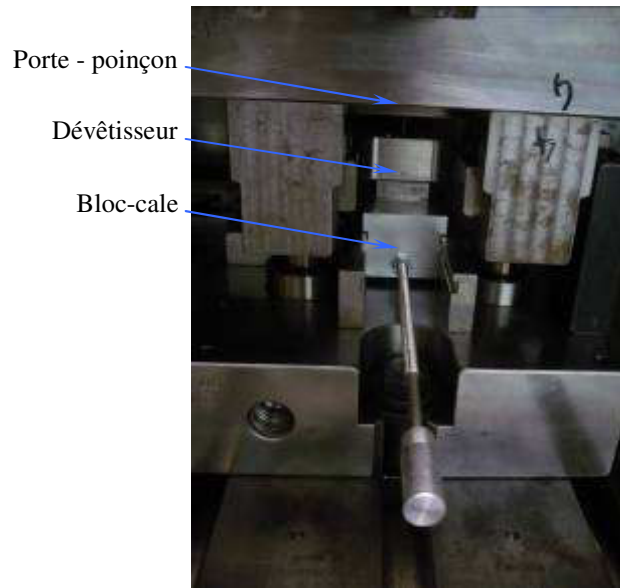


Figure 3. 28: Bloc-cale en position de prise d'empreinte du poinçon dans l'outil de découpage

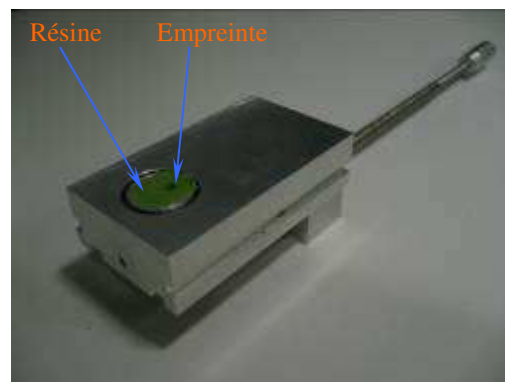


Figure 3. 29: Bloc-cale après prise d'empreinte du poinçon

La résine utilisée pour la prise d'empreinte est fabriquée par *Coltène Whaledent (Suisse)* et a comme dénomination *Président plus jet Light Body*. C'est un élastomère polymérisant par réaction d'addition composé d'une base et d'un catalyseur (*figure 3.30*).



Figure 3. 30: La résine utilisée pour le moulage

Ce silicone possède les caractéristiques suivantes : stabilité dimensionnelle illimitée dans le temps, mémoire élastique et résistance à l'arrachement, reproduction des détails les plus fins et réduction de la formation de bulles.

b) Méthodologie de réalisation de la réplique du poinçon

Suite à la prise d'empreinte du poinçon, et afin de faciliter l'analyse et l'observation des surfaces avec un microscope, des répliques (*figure 3.31*) sont réalisées. Ce sont ces répliques qui seront utilisées pour déterminer les profils d'usure. Il s'agit cette fois d'un nouveau "positif" du poinçon, d'où le nom de technique de "double réplique"

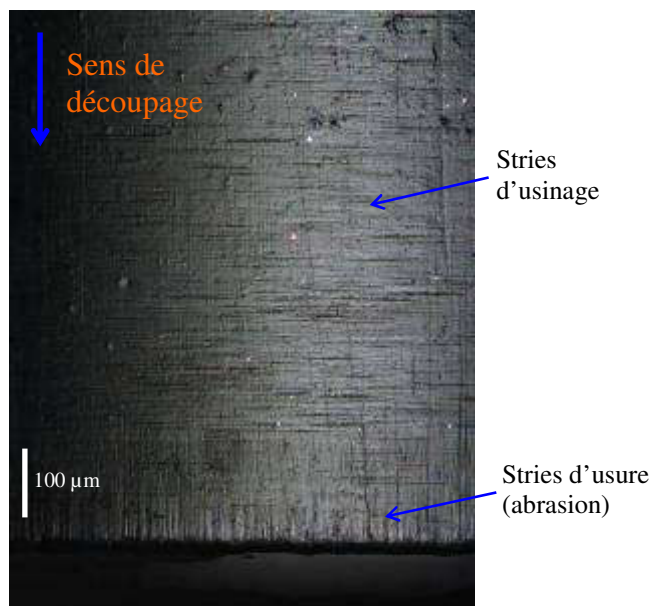


Figure 3. 31: Photo de la réplique du poinçon H20S rectifié à 787 500 coups de presse

Pour la réalisation des répliques du poinçon, on utilise une résine Polyuréthane bi-composants: *Rencast FC 52 Isocyanate* et *Rencast FC 52 Polyol* fabriquée par *RenShape (Allemagne)*. La résine polyuréthane obtenue est très fluide, cela facilite la réalisation des répliques sur les moules à petites dimensions. La prise est effective à température ambiante en 5 minutes, et le durcissement avant démoulage est obtenu entre 1,5 et 2 heures.

Sur *les figures 3.32 et 3.33* on trouve une comparaison entre les images optiques acquises sur le poinçon H20S rectifié et sur sa réplique.

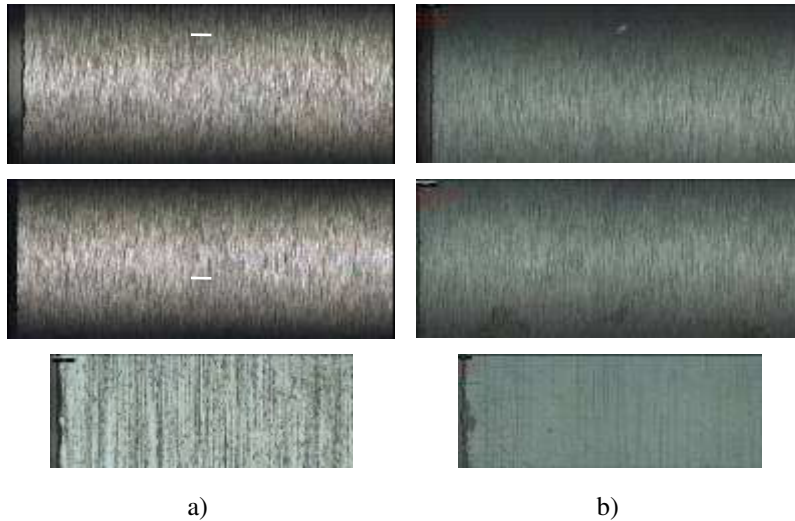


Figure 3. 32 : Images optiques du poinçon H20S rectifié et de sa réplique

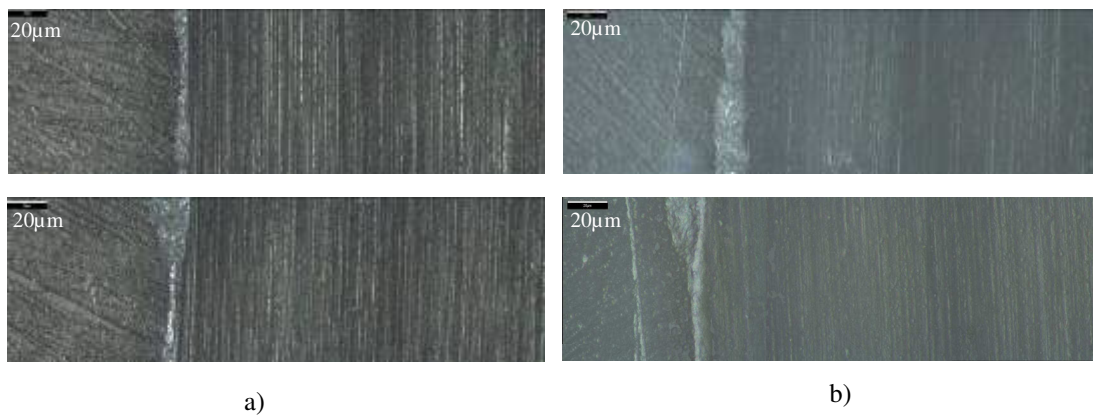


Figure 3. 33 : Images optiques de l'arête du poinçon H20S rectifié et de sa réplique

On constate sur ces figures la reproduction des détails d'usinage du poinçon. Les défauts sur l'arête de découpe du poinçon sont aussi parfaitement reproduits (*figure 3.33*). Au vu de ces résultats nous pouvons appliquer cette méthode lors de nos essais de découpage.

c) Méthodologie de la mesure du volume d'usure des répliques par profilométrie

Une fois la réplique d'un poinçon réalisée, le calcul du volume d'usure est effectué en se basant sur le relevé de profils d'usure de l'arête de découpe de cette réplique. Quatre points de mesures, diamétralement opposés, sont identifiés sur l'arête de la réplique. Par la suite, en utilisant le microscope optique InfiniteFocus® quatre images 3D sont acquises sur la réplique positionnée à 45° sur la table de mesure (*figure 3.34*).

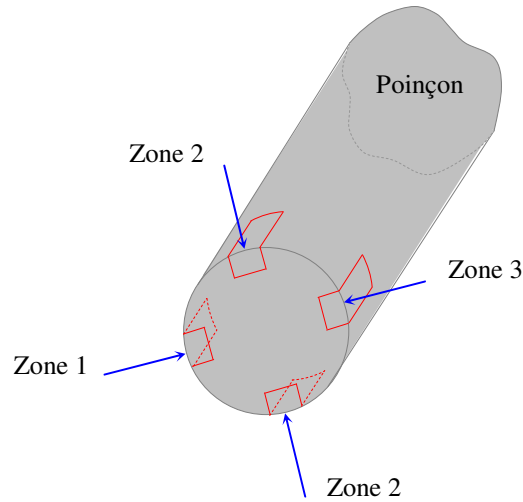


Figure 3. 34: Les quatre zones de relevés des profils d'usure sur une réplique

Sur chacune des zones identifiées un profil est relevé sur l'arête de découpe. Ces profils représentent l'état d'usure constaté en fonction du nombre de coups de presse. Une modélisation de chaque profil par une équation mathématique est effectuée (figure 3.35).

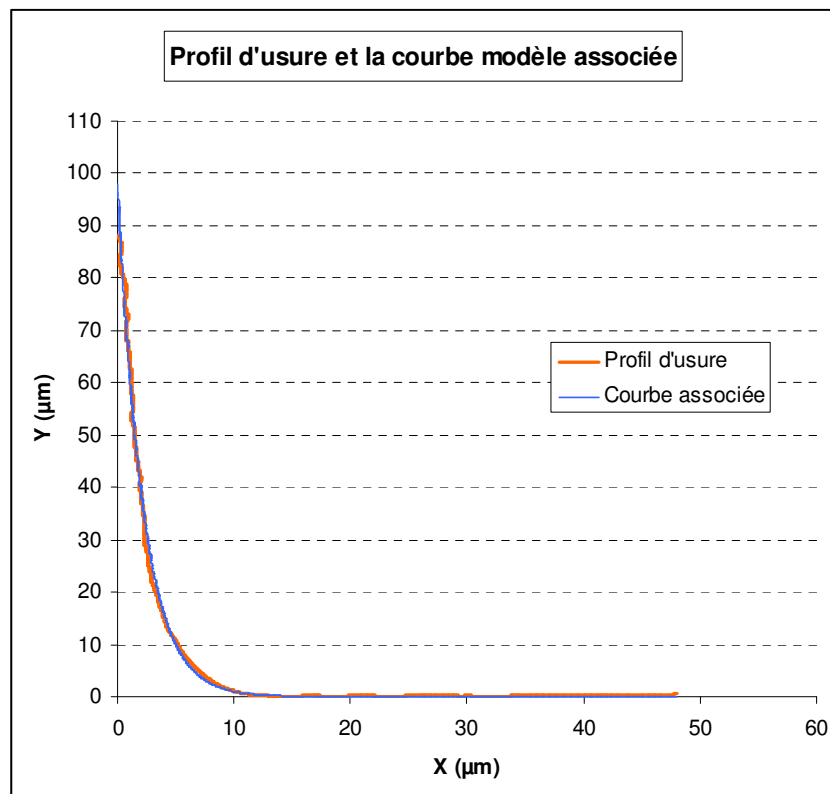


Figure 3. 35: Exemple de profil d'usure de la réplique du poinçon à 550 000 coups de presse

Cette équation permet le calcul du volume d'usure en réalisant une intégration sur le périmètre du poinçon. L'utilisation de cette méthode de calcul pour approcher le volume

d'usure total sur un poinçon est facilitée par la géométrie cylindrique du poinçon. Ainsi, on associe à chaque profil une valeur d'usure. Le volume total d'usure d'une réplique est issu d'une moyenne des quatre valeurs calculées sur les quatre profils d'usure et de l'intégration sur le périmètre du poinçon.

d) Mesures de répétabilité et précision de la mesure

Afin d'établir la répétabilité de la méthode mise en oeuvre pour relever les profils d'usure sur un outil industriel, cinq moulages consécutifs, correspondant au même état d'usure, ont été réalisés. La moyenne du volume d'usure obtenue est de $2734,2 \cdot 10^3 \mu\text{m}^3$. L'écart type correspondant est de $14,2 \cdot 10^3 \mu\text{m}^3$.

L'incertitude de mesure est calculée à $\pm 28 \cdot 10^3 \mu\text{m}^3$ pour chaque point sur la courbe (correspondant à ± 2 écarts types). Sur 50 000 coups de presse (*figure 3.36*), l'augmentation du volume d'usure est approximativement égale à $100 \cdot 10^3 \mu\text{m}^3$, ce qui correspond à plus de 7 fois l'écart type.

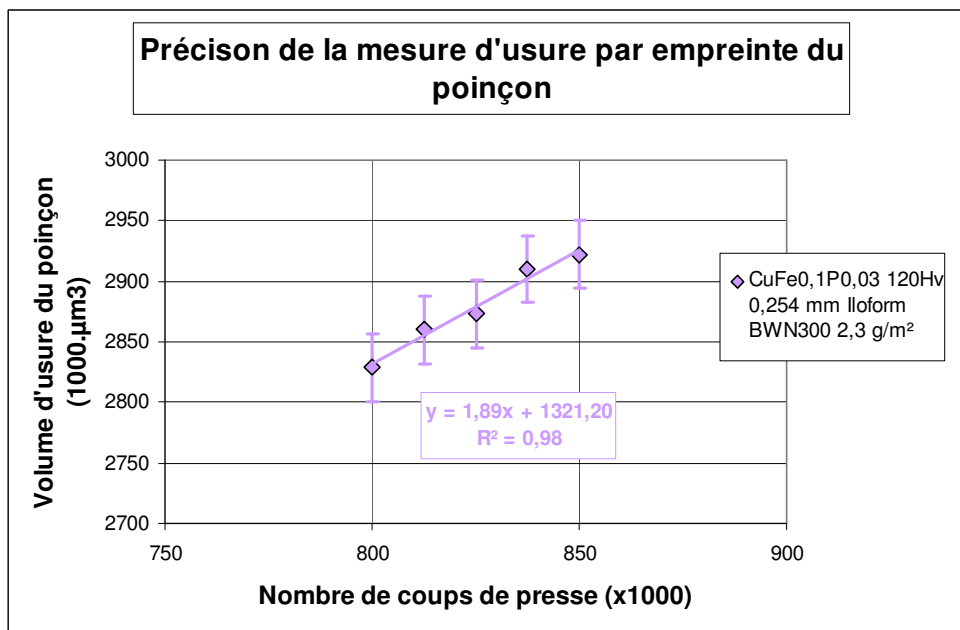


Figure 3. 36: Comparaison de l'incertitude de la mesure par rapport aux variations naturelles de l'usure
(Valeurs brutes obtenues par réplique du poinçon)

On considère alors que la précision de la mesure est suffisante pour calculer l'évolution de l'usure (pente) sur 50 000 coups de presse avec une acquisition tous les 12 500 coups.

e) Validation de la mesure de l'usure par réplique au cours de la découpe.

Pour valider la faisabilité de la méthode de mesure, nous avons choisi de découper trois séries de 50 000 coups de presse. Les première et troisième séries sont réalisées dans des conditions identiques. Quant à la deuxième série, nous avons remplacé la matière découpée (tôle CuFe0.1P0.03 de dureté 120 Hv et 0.254mm d'épais) par la nuance de tôle CuSn6 de dureté 190Hv et 0.2mm d'épais. Les résultats obtenus sont illustrés par la *figure 3.37*.

On observe (*figure 3.37*) qu'un changement de paramètre de découpe, à savoir la matière découpée, se traduit par une augmentation significative de la pente correspondant à la vitesse d'usure. De plus, un retour aux conditions initiales donne une pente d'usure équivalente. Ces deux résultats permettent de postuler que la mesure d'usure par double réplique sur poinçon est robuste et a une sensibilité adaptée à la mesure de la cinétique d'usure des poinçons.

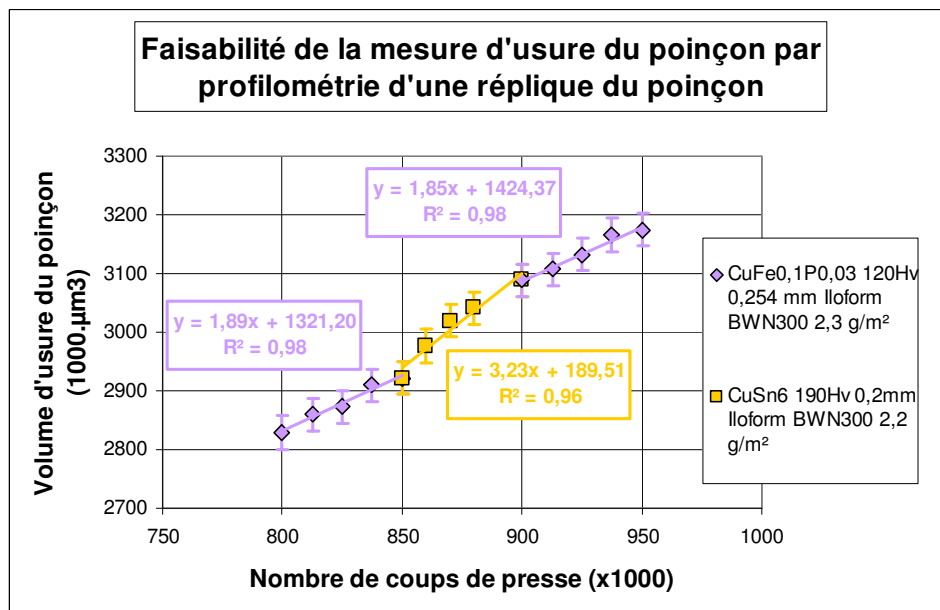


Figure 3. 37: Faisabilité de la méthode de mesure par profilométrie

La méthode de mesure de l'usure du poinçon, in situ dans l'outil de découpe par profilométrie sur réplique du poinçon obtenue par moulage, permet la mesure de l'influence des paramètres de découpage sur l'usure. Cette mesure par double réplique nécessite 50 000 coups de presse pour chaque paramètre avec une mesure tous les 12 500 coups pour obtenir une précision satisfaisante.

Des mesures comparatives (*tableau 3.10*) ont été réalisées en fin d'essais. Les valeurs d'usure obtenues par réplique sont comparées à des mesures directes sur le poinçon (également obtenues par profilométrie).

Nombre de coups de presse	Conditions de mesure	Volume d'usure (x 1000 μm^3)	Ecart
550 000	réplique du poinçon	2095 +/- 28	
	mesure directe sur poinçon	2500 +/-28	
1 700 000	réplique du poinçon	4325 +/- 28	
	mesure directe sur poinçon	5536 +/- 28	

Tableau 3. 10 : Volume d'usure mesuré sur réplique et directement sur le poinçon.

On enregistre un écart important entre les valeurs d'usure mesurées par réplique et les mesures réalisées directement sur le poinçon (*tableau 3.10*). Les mesures réalisées sur les répliques sont approximativement 23% plus faibles que les mesures réalisées directement sur le poinçon, et ceci aussi bien à 550 000 coups qu'à 1 700 000 coups. On explique ce comportement par un phénomène de retrait de la résine servant à la réalisation de l'empreinte. L'ensemble des valeurs données dans la suite du document devront donc être corrigées, avec un facteur correctif de 23% appliqué aux valeurs mesurées par réplique.

3.4. Métrologie des pièces découpées

La qualité des pièces découpées s'apprécie essentiellement au travers de deux critères ; d'une part l'aspect du bord découpé et d'autre part la quantité de bavure, généralement introduite sous forme d'une hauteur de celle-ci.

Afin de déterminer la qualité du découpage nous allons observer des profils dans l'épaisseur des pièces découpées. Le but est de mesurer les hauteurs des différentes zones constituant chaque bord découpé. Concernant la bavure, la possibilité d'estimer sa quantité sur les pièces découpées reste d'une grande importance dans le domaine du découpage. Car plus particulièrement dans le cas de tôles électriques la qualité des produits est déterminée à l'aide de l'appréciation du niveau de bavure acceptable. De ce fait, il a fallu développer une

méthode de quantification qui dépasse les contraintes de mesure et remédie aux manquements des méthodes classiques de mesure de bavure.

3.4.1. Observation du profil de découpe

Le résultat de la découpe est apprécié selon des critères géométriques (profil de découpe, bavure) sur les pièces découpées. Lors des essais de découpage, nous avons réalisé des prélèvements périodiques d'échantillons de tôles découpées pour la mesure et l'observation des bords découpés et plus particulièrement de la bavure (*figure 3.38*).

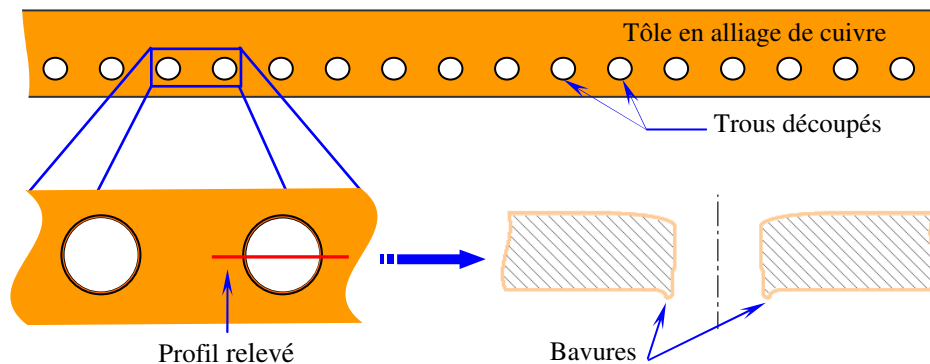


Figure 3. 38: Observation d'un bord découpé.

La *figure 3.39* présente une image au microscope optique d'un profil de découpe. On distingue quatre zones principales qui résultent de l'opération de découpage.



Figure 3. 39: Image optique d'un bord découpé sur une tôle CuFe0.1P0.3 à 6 500 coups de presse

Ces quatre zones sont H_r la zone bombée, H_c la zone cisailée, H_{ar} la zone arrachée et H_b la zone de bavure. Le bord découpé est représenté schématiquement dans la *figure 3.40*. La rupture de la tôle suite à la découpe se fait suivant un angle φ .

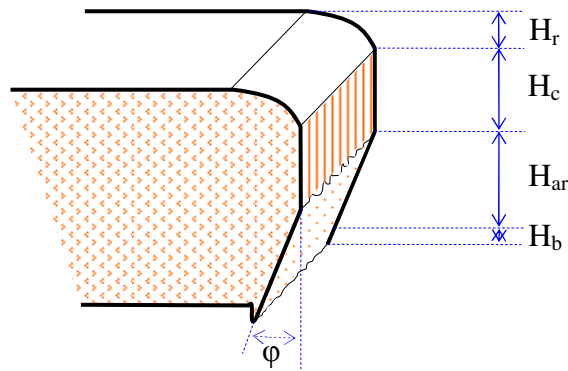


Figure 3. 40: Représentation d'un faciès de découpe

L'évolution de ces quatre zones, en fonction du nombre de pièces découpées, sera déterminée avec des mesures périodiques réalisées sur les échantillons de tôles prélevés après découpage. Ces mesures ont été accomplies sur des images topographiques 3D acquises avec le microscope optique *InfiniteFocus*® décrit dans le chapitre 2.

3.4.2. Mesure de la bavure

En fabrication, la bavure désigne un surplus involontaire de matière souvent de très faible hauteur, qui est non fonctionnel et constitue même un défaut. L'objectif de cette analyse est la mise au point d'un protocole de mesure de la bavure en exploitant l'ensemble des pièces prélevées au cours de nos essais de découpage. La méthode développée doit nous permettre de déterminer les caractéristiques de la bavure (volume, profil, hauteur, topographie,...) ainsi que l'évolution de celles-ci en fonction du nombre de pièces découpées.

Au cours de nos travaux deux méthodes ont été testées pour approcher la quantité de bavure sur les échantillons issus des essais de découpage. Comme nous allons le voir plus bas, la première méthode est fondée sur l'utilisation du logiciel de traitement d'images *SigmaScan*®. Cette démarche donne la mesure de la surface de la bavure. La deuxième méthode employée a été développée pendant notre étude pour quantifier le volume de bavure. Elle consiste à exploiter les images topographiques 3D des pièces capturées à l'aide de l'appareil *InfiniteFocus*®.

3.4.2.1. Mesure de la surface projetée des bavures

Le découpage avec un outil progressif a comme effet l'écrasement des bavures engendrées suite à la découpe (*figure 3.41*). Cela rend le suivi de son évolution à travers sa hauteur en fonction du temps difficile. En effet, l'évolution de la hauteur de bavure au cours de la découpe est minime du fait de l'écrasement. Comme indiqué dans le premier chapitre Gréban [Gréban 2006] a opté pour une solution originale afin de quantifier les bavures sur les bords découpés. Il s'agit de la mesure des surfaces projetées des bavures. Cette méthode repose sur une hypothèse liée à l'écrasement des bavures. Nous pourrions considérer que la hauteur de bavure est la même sur le contour des trous, et ce pour tous les échantillons de tôles prélevés.

En adoptant cette hypothèse, il est possible de relever les surfaces des bavures et les mesurer et ainsi, aboutir à l'évolution de la surface apparente des bavures en fonction du nombre de coups de presse.

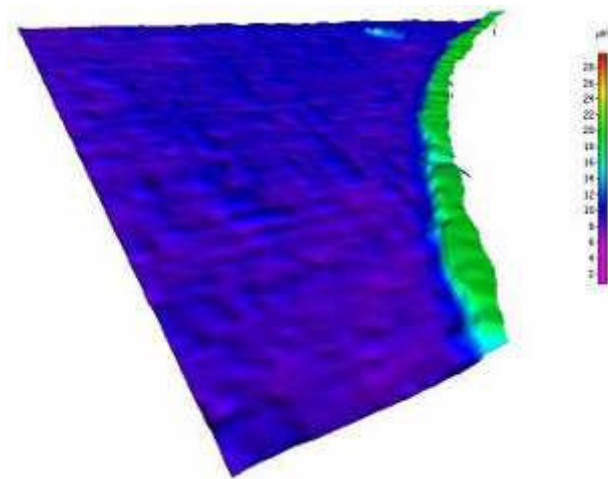


Figure 3. 41: Relevé topographique d'une bavure écrasée

Cette méthode, qui a été reconduite pendant nos travaux, se décompose en trois principales étapes. Premièrement, des acquisitions d'images topographiques sont réalisées avec le dispositif optique *InfiniteFocus*®. Ces images représentent les formes découpées prises côté bavure. Deuxièmement, en utilisant le logiciel de traitement d'images *SigmaScan*®, on délimite point par point sur chaque échantillon les surfaces occupées par la bavure écrasée sur le contour de la forme découpée (*figure 3.42*), ce qui, au final, permet au logiciel de calculer les surfaces correspondantes.

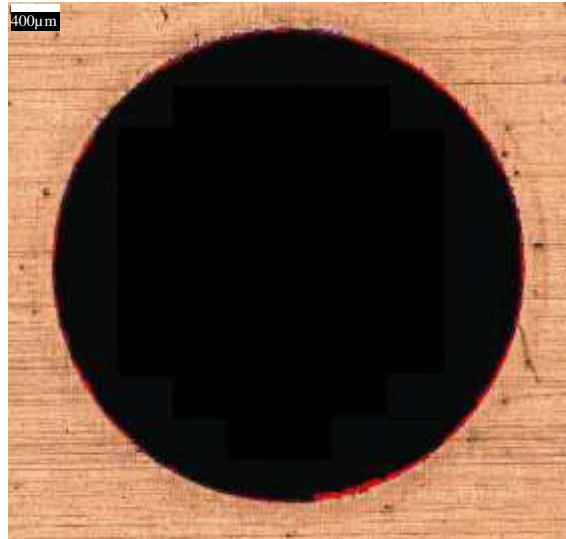


Figure 3. 42: Marquage de la surface de la bavure

Pour des échantillons avec une grande bavure (c.-à-d. des échantillons obtenus au bout d'un grand nombre de coups de presse) la hauteur de la bavure écrasée paraît homogène, celle-ci peut alors être quantifiée par sa surface. Mais, au cours des mesures, certains échantillons (échantillons du début de la découpe) ont présenté des hauteurs non homogènes, la hauteur de la bavure variant le long du contour du trou. Ainsi, l'hypothèse formulée précédemment ne peut pas être appliquée dans tous les cas.

De ce fait nous avons travaillé sur le développement d'une mesure capable de quantifier l'évolution des bavures sur les pièces découpées tout au long de la découpe. Cette quantification sera faite grâce à la mesure directe du volume de bavure sur les bords découpés.

3.4.2.2. Mise au point et optimisation d'une méthode de quantification de la bavure

La présence d'une quantité critique de bavure dans les applications industrielles de pièces découpées, et le besoin ressenti par les scientifiques de pouvoir confronter leurs résultats théoriques à des données expérimentales fiables, nous ont amené à proposer une méthodologie de référence de mesure de la quantité de bavure. Cette méthode doit également remédier aux difficultés et aux contraintes de mesure citées précédemment, à savoir l'inhomogénéité de la hauteur de la bavure sur les bords découpés, l'écrasement de la bavure, ...

Le premier défi de ce travail est de mesurer avec précision des tailles très petites de bavure variant de 0 jusqu'à 10 micromètres de hauteur, et sur des larges zones le long du périmètre de la forme découpée. Le second concerne la mesure des bavures écrasées avec les outils de découpage progressif suite aux coups de presse successifs. L'observation d'un bord découpé côté bavures, montre une surface avec une déformation en amont de la bavure (figures 3.43 et 3.44).

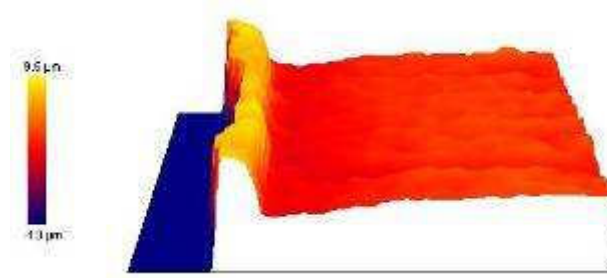


Figure 3. 43: Surface de la tôle découpée côté bavure

De plus, si l'on souhaite disposer d'un plan de référence constitué par la tôle non déformée, il faut également que le champ des données soit largement plus grand que le seul contour du trou. Pour relever ces défis et réussir à développer une méthode de mesure, nous avons opté pour la topomicroscopie.

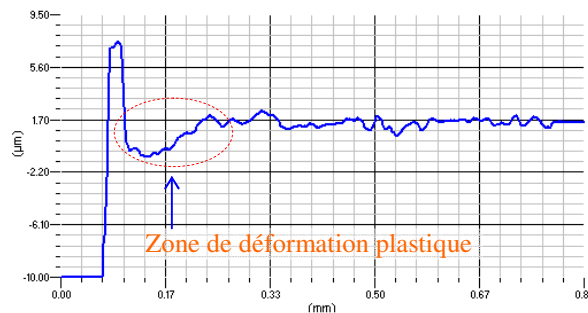


Figure 3. 44: Exemple d'un profil de bavure avec une déformation plastique

A partir d'images topographiques 3D, acquises avec le microscope *InfiniteFocus*®, nous réalisons un traitement numérique permettant de calculer les volumes de bavures sur les bords découpés.

Pour ce faire, nous avons développé un logiciel de traitement d'images permettant le calcul précis du volume total de la bavure. Ce calcul est réalisé à partir d'une image topographique, obtenue avec le microscope *InfiniteFocus*®, de la forme découpée.

L'originalité de la méthode réside dans le traitement de la forme découpée, circulaire dans notre cas.

Le principe consiste à transformer l'image topographique originale (trou circulaire) en une image où chaque ligne représente un relevé topographique selon un rayon en fonction de l'angle de 0 à 360° (*figure 3.45*), ceci en éliminant les défauts de la surface (défaut de forme du plan initial et déformation plastique locale). Un calcul simple permet alors de remonter au volume de la bavure.

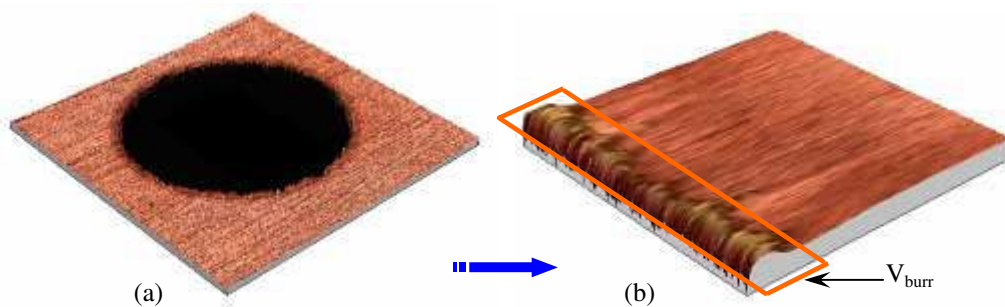


Figure 3. 45: Transformation de l'image topographique.

(a) Image originale du trou découpé

(b) Image construite avec les profils radiaux

Les étapes de cette transformation et le protocole de mesure sont décrits plus précisément via cinq grandes étapes successives :

a) Redressement de l'image

Dans un premier temps, l'image topographique est redressée par un plan des moindres carrés. Ce plan est calculé en excluant le trou de découpe et la zone de bavure. Pour ce faire un masque circulaire excluant cette zone est appliqué sur l'image (*figure 3.46*).

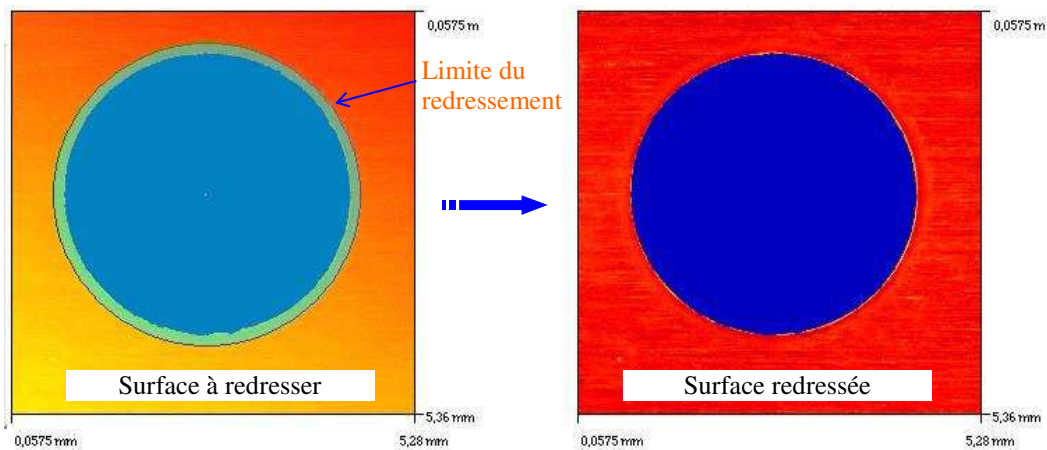


Figure 3. 46: Redressement autour du trou découpé par le plan des moindres carrés après création d'un masque

Cette transformation permet d'éliminer le défaut de planéité de la surface initiale de la tôle autour de la forme découpée.

b) Extraction des profils

La deuxième étape consiste à extraire des profils radiaux de l'image topographique du trou découpé. Ces profils sont ensuite assemblés en fonction de l'angle d'orientation (compris entre 0 et 2π radians). On ne garde le profil radial qu'à partir du bord du trou découpé (figure 3.47). La difficulté d'automatisation de cette phase vient du fait que le trou découpé n'est pas parfaitement circulaire.

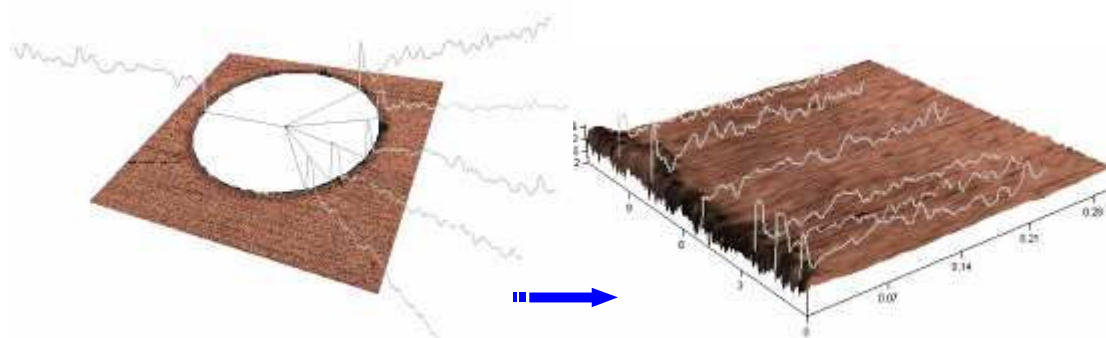


Figure 3. 47: Extraction de profils radiaux et création d'une image topographique redressée.

La méthode d'extraction est la suivante : On extrait N profils entre deux angles α_1 et α_2 . Chacun de ces profils (obtenu à un angle α) est une moyenne de m profils entre $\alpha \pm (\alpha_2 -$

$\alpha_i)/2.N$. L'image finale contient donc N profils obtenus à partir de $m.N$ profils mesurés. L'extraction d'un profil à un angle quelconque nécessite une interpolation de l'image topographique initiale.

Par exemple, pour le calcul du volume complet de la bavure on choisit une variation d'angle entre 0 et 2π radians. Le nombre de profils N est de 360 (un profil par degré), et chaque profil est une moyenne de m profils, pouvant varier de 1 à 10000. Cela revient à effectuer entre 360 et 3 600 000 profils pour obtenir l'image finale. On peut optimiser les valeurs N et m afin de s'affranchir de l'hétérogénéité de la bavure.

c) Suppression de la déformation plastique

Un traitement supplémentaire de l'image obtenue est nécessaire avant le calcul du volume de la bavure. En effet, le découpage crée une déformation plastique locale autour du trou circulaire découpé (figure 3.48).

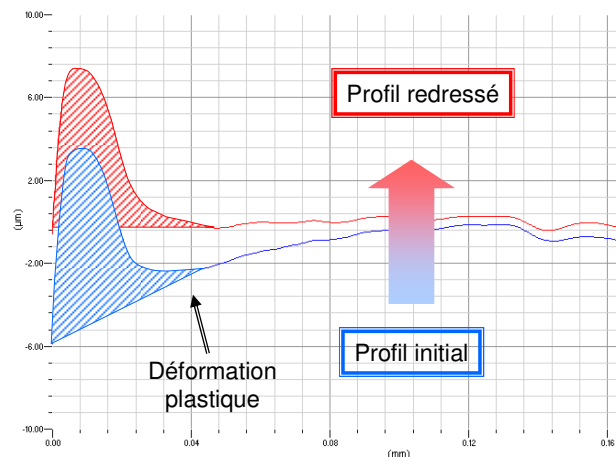


Figure 3. 48: Redressement des profils

Le profil initial (en bleu) est redressé (en rouge) par un polynôme des moindres carrés afin d'éliminer la déformation plastique lors du découpage

Le volume réel de la bavure est représenté en bleu sur la figure 3.48. Afin d'effectuer le calcul, chaque profil de l'image est redressé par un polynôme des moindres carrés (de degré variable) calculé sur la zone externe à la bavure. On obtient ainsi une image où tous les profils sont redressés, on élimine ainsi le défaut dû à la déformation plastique.

d) Calcul du volume de la bavure

Le calcul du volume total de la bavure est obtenu en calculant la surface positive dans la zone de bavure par rapport à la ligne moyenne (calculée hors de cette zone, voir figure 3.49).

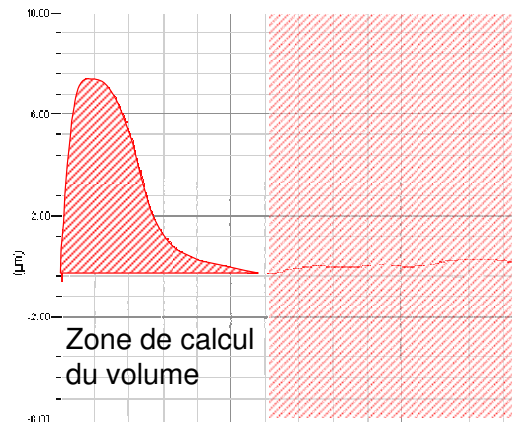


Figure 3. 49: Calcul du volume de la bavure

(Obtenu en calculant la surface positive pour chaque profil dans la zone de bavure)

Une intégration sur tous les profils permet au final d'obtenir le volume total de la bavure.

3.4.2.3. Précision de la quantification du volume de bavures (Sensibilité au nombre de profils)

La surface reconstituée obtenue avant la mesure du volume de la bavure (figure 3.45) est issue de l'assemblage de plusieurs profils relevés sur le bord découpé (360 profils représentant chacun la moyenne de 100 profils acquis, ce qui correspond à 36 000 profils extraits de l'image initiale). Cette valeur a été retenue après avoir réalisé une étude de la sensibilité du volume de bavure mesuré par la technique présentée précédemment en fonction du nombre de profils. En effet, on peut raisonnablement imaginer que, la bavure n'étant pas nécessairement homogène sur l'ensemble du contour découpé, la valeur du volume de bavure soit fortement dépendante du nombre de relevés et, éventuellement, de leur localisation.

Pour ce faire, sur cinq pièces prélevées à des nombres de coups de presse croissants (tableau 3.11), un certain nombre de profils ont été relevés puis assemblés selon le protocole décrit précédemment.

Pièces étudiées	Nombres de profils relevés						
	50	100	500	1000	2000	3000	Réf.
50 coups de presse	0.21	0.25	0.22	0.26	0.27	0.30	0.34
10 000 coups de presse	0.33	0.33	0.34	0.39	0.45	0.44	0.44
20 000 coups de presse	0.43	0.47	0.45	0.49	0.51	0.57	0.54
30 000 coups de presse	0.41	0.44	0.46	0.49	0.50	0.50	0.56
40 000 coups de presse	0.34	0.35	0.39	0.40	0.41	0.44	0.61

Tableau 3. 11 : Volume de la bavure ($\mu\text{m}^3 \times 10^6$) en fonction du nombre de profils

On peut représenter ces résultats de manière plus illustrative par la *figure 3.50* où, pour chacune des pièces découpées, est présentée l'évolution du volume de bavure en fonction du nombre de profils mesurés.

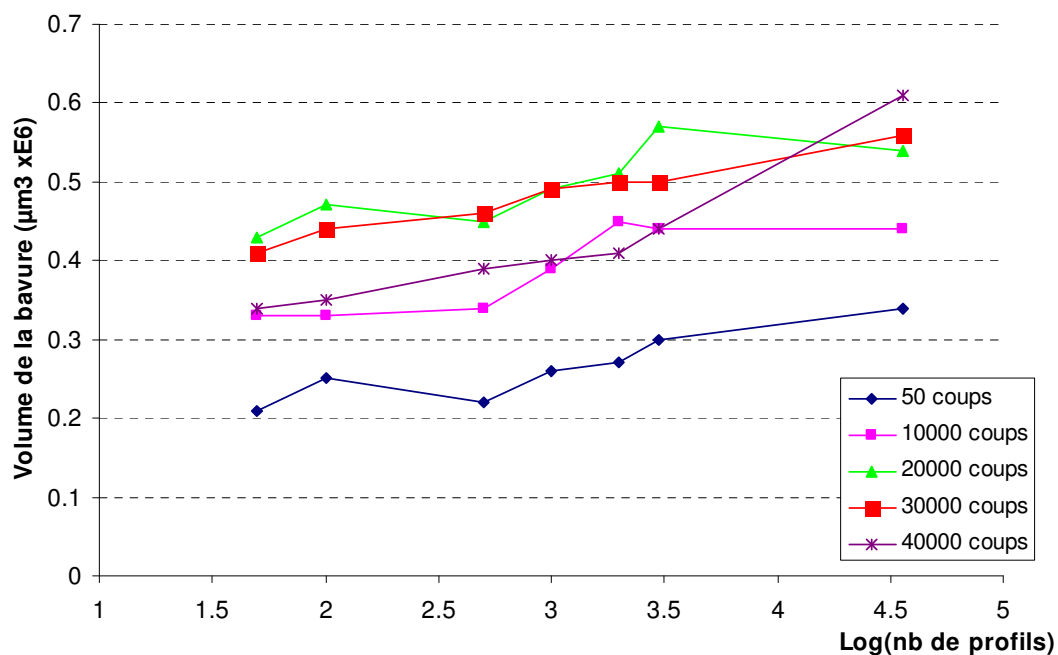


Figure 3. 50: Evolution du volume de bavure en fonction du nombre de profils

Enfin, dans le *tableau 3.11* et sur la *figure 3.50*, figurent également les valeurs issues du protocole de référence retenu pour la suite de l'étude : l'extraction de 36 000 profils de l'image mesurée (100 profils par degré), moyennés pour constituer une banque de 360 profils (*figure 3.51*).

On peut voir sur la *figure 3.50* qu'un faible nombre de profils sous estime la quantité réelle de bavure. En raison de la non homogénéité de la bavure sur le contour découpé, la

méthode de référence semble la plus adaptée, car elle est obtenue à partir d'un nombre élevé de profils, ce qui a l'avantage de permettre un balayage complet du bord découpé.

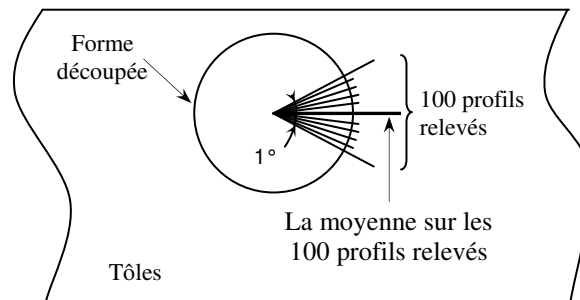


Figure 3. 51: Protocole de construction des profils retenus pour les calculs

3.5. Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre les essais expérimentaux de découpage réalisés dans le cadre de nos travaux. Au cours de ces essais, des méthodes de mesures et de quantification ont été utilisées. Les principaux objectifs consistaient à suivre l'évolution de l'usure d'une part et de la bavure d'autre part en fonction du nombre de coups de presse, afin de quantifier la qualité des pièces découpées.

Le suivi de l'usure des poinçons a été réalisé en temps réel et sans démontage grâce à l'application de deux méthodes originales de mesure. La première méthode est l'activation superficielle, qui permet l'accès à la valeur d'usure à un instant donné en fonction du nombre de coups de presse. Cette donnée est obtenue en corrélant la matière perdue sur le poinçon par usure et l'activité résiduelle sur ce même poinçon activé. La deuxième méthode est celle dite de la "double réplique", qui offre la possibilité d'obtenir les profils d'usure de l'arête de découpe sur le poinçon en fonction du nombre de coups de presse. Le traitement de ces profils permet d'approcher la valeur d'usure d'un poinçon. Cette méthode de mesure a l'avantage d'être réalisée sans démontage de l'outil, comme la mesure par activation superficielle.

Quant à la bavure, il est important de pouvoir réduire les causes qui conduisent à son apparition. Pour ce faire, il était nécessaire de disposer au préalable d'un moyen de mesure fiable de la quantité de bavure sur les pièces découpées. Compte tenu de la physionomie générale de la bavure sur un bord découpé, l'élaboration de la méthode de quantification prend en compte la distribution de la bavure sur le bord découpé. En effet, son inhomogénéité nous a poussé à mettre en place une solution de mesure basée sur le prélèvement d'un grand

nombre de profils sur les bords découpés. Devant la puissance de cette méthode, la mesure des surfaces de la bavure a été abandonnée pour la suite des analyses. En effet, seule la mesure du volume de la bavure nous permet de caractériser convenablement son évolution au cours de la découpe.

En conséquence, nous disposons à présent de méthodes qui nous permettront de réaliser par la suite une confrontation de la quantité de bavure mesurée avec le niveau d'usure du poinçon. Cette confrontation pourra donc être opérée grâce à la mise au point de méthodes originales de mesures « in situ » et en continu sur une presse de l'usure et du volume total de bavure.

Chapitre 4

Résultats expérimentaux

Liste des figures et tableaux

Figure 4. 1 : Images MEB sur l'arête du poinçon 1 (H20S) rectifié.....	137
Figure 4. 2 : Images MEB sur l'arête du poinçon 2 (H20S) usiné par fil.....	138
Figure 4. 3 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de coups de presse	140
Figure 4. 4 : Profil usé sur l'arête de découpe à 588 000 coups de presse	142
Figure 4. 5 : Représentation du volume d'un corps de révolution autour d'un axe	143
Figure 4. 6 : Profil et zone d'usure sur le poinçon	143
Figure 4. 7 : Profil de calcul du volume d'usure	143
Figure 4. 8 : Influence de la nuance découpée sur l'usure du poinçon (essai 1).....	145
Figure 4. 9 : Influence de la nuance de matière découpée sur l'usure du poinçon (essai 2).....	147
Figure 4. 10 : Influence de l'épaisseur de la tôle découpée sur l'usure du poinçon (essai 2).....	148
Figure 4. 11 : Influence de l'épaisseur de la tôle découpée sur la vitesse d'usure du poinçon (essai 2)	148
Figure 4. 12 : Structure micrographique du CuAl avec oxydules	150
Figure 4. 13 : Micrographies électroniques à balayage du CuAl H12.....	150
Figure 4. 14 : Micrographies électroniques à balayage du CuZn33 H12	151
Figure 4. 15 : Micrographie électronique en transmission du CuZn33.....	151
Figure 4. 16 : Structure micrographique du Cube 1/2 H avec mackles.....	152
Figure 4. 17 : Micrographies électroniques à balayage du CuBe2 1/2 H.....	152
Figure 4. 18 : Micrographies électroniques à balayage du CuSn6	153
Figure 4. 19 : Structure micrographique du CuNi3Si.....	153
Figure 4. 20 : Micrographies électroniques à balayage du CuNi3Si.....	154
Figure 4. 21 : Micrographie électronique en transmission du CuNi3Si.....	154
Figure 4. 22 : Micrographies électroniques à balayage du CuFe0.1P0.03.....	155
Figure 4. 23 : Micrographie électronique en transmission du CuFe0.1P0.03	155
Figure 4. 24 : Micrographies électroniques à balayage du CuSn3Zn9	155
Figure 4. 25 : Micrographies électroniques à balayage du CuSn3Zn9.....	156
Figure 4. 26 : Système Raziol de lubrification des tôles	158
Figure 4. 27 : Influence sur l'usure du poinçon de la quantité d'huile sur la tôle (Huile 1) (essai 1)	159
Figure 4. 28 : Influence de la quantité d'huile déposée sur la bande sur la vitesse d'usure du poinçon (huile 1) (essai 1).....	159
Figure 4. 29 : Influence de la nature de lubrifiant utilisé sur l'usure du poinçon.....	160
Figure 4. 30 : Influence de la nuance de lubrifiant sur l'usure du poinçon (essai 2).....	162
Figure 4. 31 : Influence du mode d'usinage sur l'usure du poinçon	163
Figure 4. 32 : Images MEB poinçon 1 usé.....	164
Figure 4. 33 : Images MEB poinçon 2 usé.....	164
Figure 4. 34 : Influence de l'épaisseur sur l'évolution du bord découpé	165
Figure 4. 35 : Influence de la nuance de tôle sur l'évolution du bord découpé.....	165
Figure 4. 36 : Bavure écrasée.....	167
Figure 4. 37 : Exemple d'inhomogénéité de la bavure sur un bord découpé.....	167
Figure 4. 38 : Evolution du volume de la bavure en fonction du nombre de coups de presse	168
Figure 4. 39 : Influence de la nature des tôles sur l'évolution du volume de la bavure (essai 1).....	169
Figure 4. 40 : Influence de la lubrification sur l'évolution du volume de la bavure (essai 1).....	170
Figure 4. 41 : Taux d'usure des billes en fonction des nuances de tôles.....	171
Figure 4. 42 : Vitesse d'usure du poinçon usiné par fil en fonction des tôles découpées	172
Figure 4. 43 : Vitesse d'usure du poinçon en fonction des tôles découpées	173
Figure 4. 44 : Evolution de l'usure et de la quantité de la bavure	174

Tableau 4. 1 : Images optiques sur l'arête de découpe du poinçon carbure H20S rectifié	135
Tableau 4. 2 : Images optiques sur l'arête de découpe du poinçon carbure H20S usiné par fil	135
Tableau 4. 3 : Rayons des arêtes de découpes pour chaque poinçon	136
Tableau 4. 4 : Images optiques du bout du poinçon carbure H20S rectifié.....	136
Tableau 4. 5 : Images optiques du bout du poinçon carbure H20S usiné par fil.....	137
Tableau 4. 6 : Diamètres des poinçons.	137
Tableau 4. 7 : Tôles découpées lors de l'essai de faisabilité et leurs caractéristiques mécaniques	139
Tableau 4. 8 : Description des différentes configurations de l'essai de faisabilité.....	139
Tableau 4. 9 : Différentes valeurs de cinétique d'usure enregistrées	141
Tableau 4. 10 : Influence de la nuance de matière découpée sur l'usure du poinçon (essai 1).....	145
Tableau 4. 11 : Indice d'abrasivité des tôles découpées (+/- 2 σ) (essai 1).....	146
Tableau 4. 12 : Caractéristiques des matières découpées (essai 2).....	147
Tableau 4. 13 : Indice d'abrasivité des nuances de tôle découpées (essai 2).....	147
Tableau 4. 14 : Indice d'abrasivité des nuances découpées dans les deux campagnes d'essais,	149
Tableau 4. 15 : Indice d'abrasivité des nuances découpées dans les deux campagnes d'essais	157
Tableau 4. 16 : Caractéristiques mécaniques des nuances testées	157
Tableau 4. 17 : Données techniques des lubrifiants étudiés	160
Tableau 4. 18 : Influence de la nature du lubrifiant utilisé sur la vitesse d'usure du poinçon (essai 1)	161
Tableau 4. 19 : Indice de performance des lubrifiants à grammage équivalent.....	161
Tableau 4. 20 : Indice de performance des lubrifiants.	162
Tableau 4. 21 : Confrontation cinétique d'usure du poinçon / taux d'usure	172
Tableau 4. 22 : Cinétique d'apparition de l'usure et de la bavure	175

4. Chapitre 4 : Résultats expérimentaux

4.1. Introduction

Au cours de nos essais expérimentaux de découpage, nous avons réalisé un ensemble de mesures visant à déterminer la qualité de la découpe. Elle est mesurée principalement à travers le niveau de bavure présente sur les pièces découpées. Il est également essentiel de déterminer les caractéristiques géométriques des bords découpés. Ils sont constitués d'une zone bombée, d'une zone cisailée, d'une zone arrachée et de la bavure. Ces caractéristiques propres aux pièces découpées, évoluent en fonction de l'usure des poinçons de découpe. De ce fait, l'état des poinçons a fait l'objet d'un suivi régulier au cours des essais de découpage.

Les méthodes présentées dans le chapitre 3 ont été mises en œuvre afin de réaliser l'ensemble des mesures souhaitées. Ainsi, parallèlement aux essais de découpe mis en œuvre au sein de l'entreprise *Diehl Augé Découpage (Besançon)*, des mesures ont été effectuées dans notre laboratoire, dont la quantification du volume de la bavure en fonction du nombre de coups de presse.

Ce chapitre présentera également une confrontation de la cinétique d'usure des poinçons aux taux d'usure exprimant l'abrasivité des tôles découpées évaluées dans le chapitre 2. Finalement, une corrélation entre l'usure et la bavure sera établie.

4.2. Résultats des mesures expérimentales

Les résultats présentés dans ce chapitre sont issus des mesures et métrologies effectuées avant, pendant, et après les essais de découpage. Ainsi, afin d'établir et mettre en évidence une corrélation entre l'usure des poinçons et la qualité des pièces découpées, différentes configurations ont été choisies. Nous présentons également l'influence des paramètres retenus pour notre étude.

4.2.1. Métrologie des poinçons avant les essais de découpage

Les deux poinçons utilisés dans ces campagnes d'essais ont subi une métrologie en amont visant à caractériser leur état de surfaces, relever les rayons de l'arête de découpe des

poinçons neufs et vérifier leur diamètre. Pour ce faire, des acquisitions au microscope optique Alicona®, décrit dans le chapitre 2, ont été réalisées (*tableaux 4.1 et 4.2*).

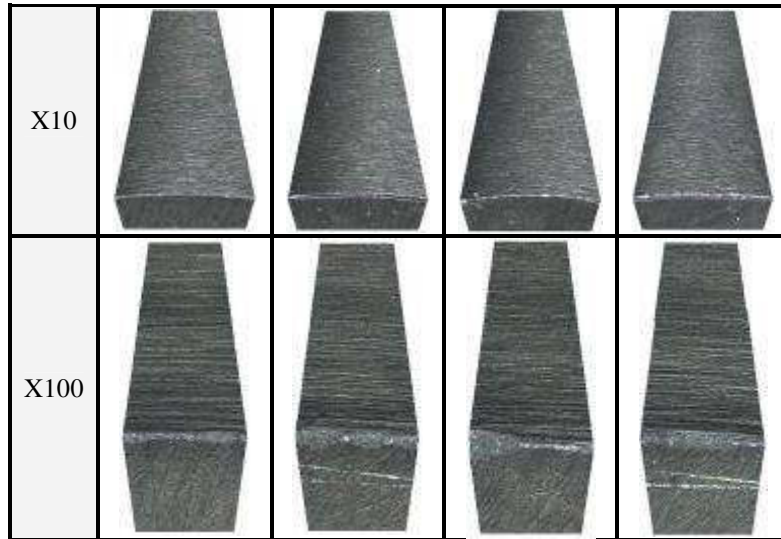


Tableau 4. 1 : Images optiques sur l'arête de découpe du poinçon carbure H20S rectifié

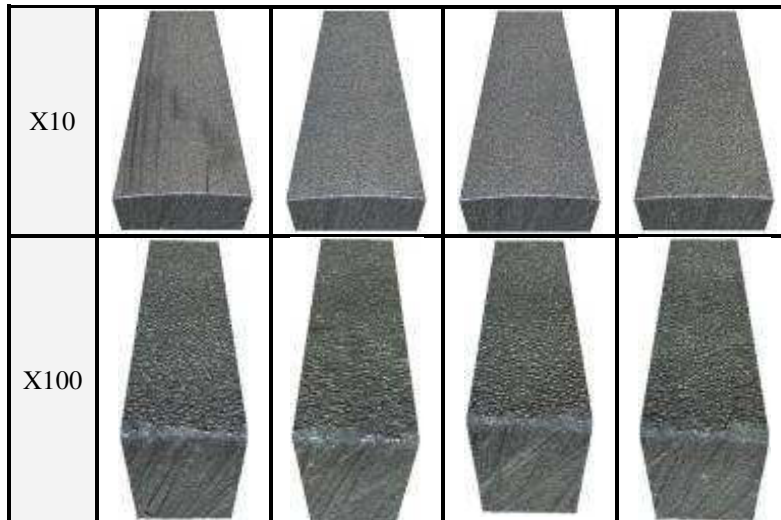


Tableau 4. 2 : Images optiques sur l'arête de découpe du poinçon carbure H20S usiné par fil

Dans ces tableaux, on trouve des images sur quatre zones placées à 90° l'une par rapport à l'autre sur l'arête de découpe de chaque poinçon. Deux grossissements ont été réalisés pour les mesures de chaque arête de découpe. Les poinçons sont positionnés à un angle de 45° par rapport à la table du microscope. Ainsi nous avons accès aux bords des poinçons.

La première vérification faite sur ces images est la présence d'un rayon au bout des poinçons. Ce rayon est mesuré pour chaque poinçon (*tableau 4.3*) en utilisant les images topographiques présentées plus haut. Sur chacune des acquisitions un rayon d'arête est mesuré, et la valeur finale retenue est la moyenne des valeurs relevées sur les quatre zones.

Poinçons	Rayon de l'arête : r_p (μm)				
	r_1	r_2	r_3	r_4	r_p
Poinçon 1 : H20S - Rectif	4.44	7.817	3.658	6.767	5,67
Poinçon 2 : H20S - Fil	4.963	5.358	5.935	4.449	5,18

Tableau 4. 3 : Rayons des arêtes de découpes pour chaque poinçon

L'évolution du rayon r_p de chaque poinçon sera suivie au cours de la découpe. En effet, l'usure des poinçons peut être qualifiée par le rayon mesuré à partir des profils des arêtes de découpe. Ces profils montreront le changement de ces rayons initiaux.

En outre, d'autres acquisitions sont réalisées sur les poinçons afin de mesurer leur diamètre. Cette fois les images sont prises sur les poinçons placés perpendiculairement à l'axe de l'objectif du microscope (*tableaux 4.4 et 4.5*).

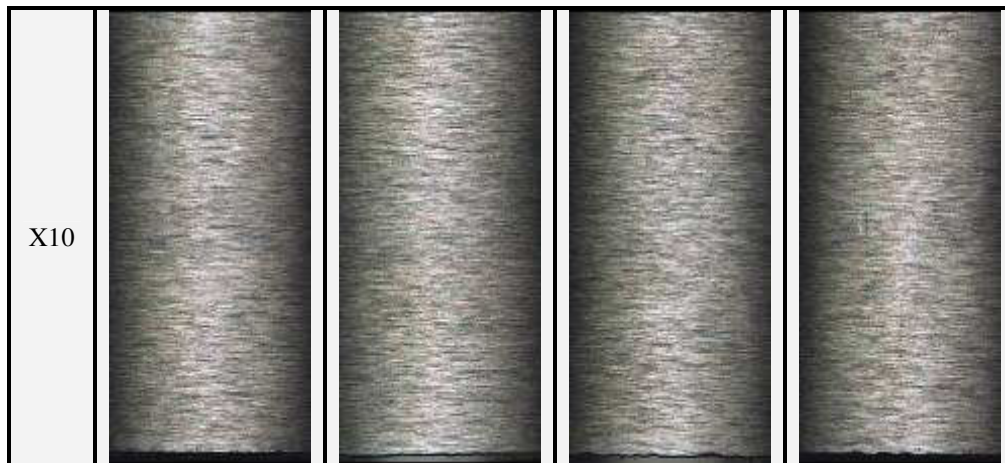


Tableau 4. 4 : Images optiques du bout du poinçon carbure H20S rectifié

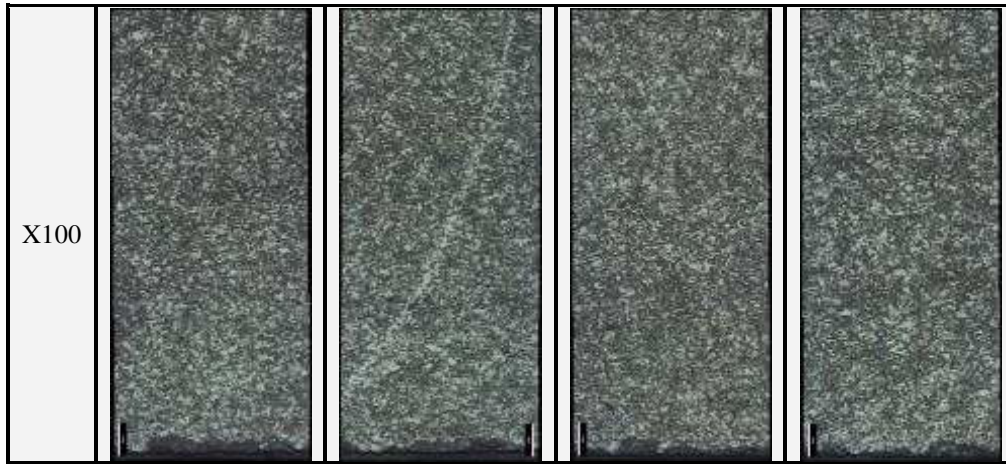


Tableau 4. 5 : Images optiques du bout du poinçon carbure H20S usiné par fil

De même qu'avec les rayons des arêtes des poinçons, quatre mesures sont réalisées sur quatre images optiques. Ces mesures, effectuées perpendiculairement à l'axe des poinçons, donnent des profils sur lesquels on relève la géométrie du diamètre. La valeur du diamètre de chaque poinçon est la moyenne des quatre valeurs obtenues (*tableau 4.6*).

Poinçons	Diamètre : D_p (mm)				
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_p
Poinçon 3 : H20S - Rectif	3,682	3,728	3,704	3,668	3,695
Poinçon 4 : H20S - Fil	3,706	3,716	3,732	3,72	3,72

Tableau 4. 6 : Diamètres des poinçons.

De plus, des images au microscope électronique à balayage ont été réalisées (*figures 4.1 et 4.2*). Ces images visent à la qualification de l'état de l'arête de découpe de chaque poinçon avant les essais de découpage.



Figure 4. 1 : Images MEB sur l'arête du poinçon 1 (H20S) rectifié

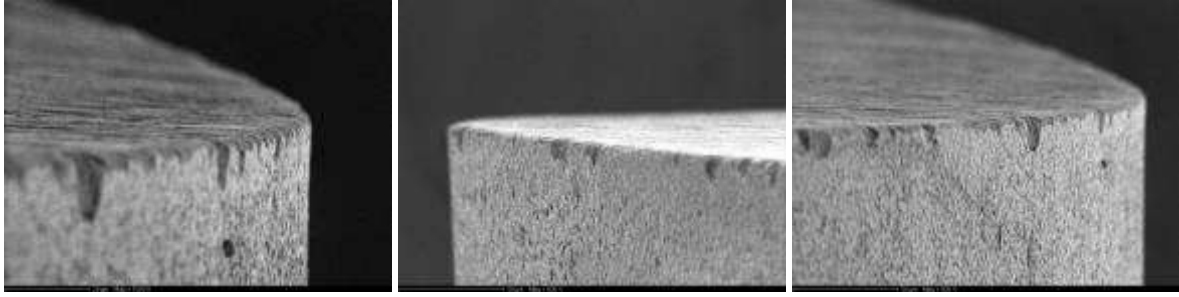


Figure 4. 2 : Images MEB sur l'arête du poinçon 2 (H20S) usiné par fil

Ces clichés révèlent la physionomie initiale des arêtes découpantes des deux poinçons utilisés pour la découpe. On constate dans les deux cas que les bords des poinçons ne sont pas réguliers. Donc, nous avons décidé de réaliser les mesures et suivis de la géométrie de chaque poinçon en quatre points diamétralement opposés.

4.2.2. Mesure et suivi de l'usure des poinçons

La particularité des méthodes présentées ici réside dans le fait que la métrologie des poinçons est réalisée « in situ », donc sans démontage des poinçons. Les mesures ont été effectuées dans le but de passer en revue l'influence de quelques paramètres intervenant dans le découpage.

Cette analyse permet en outre d'affiner la compréhension des événements et des phénomènes mis en œuvre dans un outil réel de découpage, avec notamment l'analyse du mode d'usure relevé sur les poinçons, ou encore la définition d'un indicateur de leur usure.

4.2.2.1. Mesure de l'usure par la méthode d'activation superficielle

Notre plan d'expériences a été précédé d'une campagne de découpage réalisée par Gréban [Gréban 2007]. Ces essais ont eu pour but de déterminer la faisabilité de la mesure de l'usure par la méthode d'activation superficielle (voir chapitre 3). Cette méthode originale a été appliquée dans le découpage pour la première fois au cours de cette étude.

Nous allons présenter ici les résultats issus de cette méthode. Ils constitueront une base de comparaison avec nos mesures effectuées sur le même outillage industriel utilisé par Gréban [Gréban 2007].

Différentes configurations ont été définies lors de ces essais. Les paramètres étudiés sont l'influence de la nuance des tôles en alliages de cuivre sur l'usure d'un poinçon en carbure de tungstène ainsi que l'influence de la quantité du lubrifiant déposé sur les tôles.

Les alliages sont étudiés dans leurs états H12 (20% d'écrouissage au laminage final des tôles). Les tôles découpées lors de cet essai et leurs propriétés mécaniques sont listées dans le *tableau 4.7*.

Tôles	E (GPa)	Re (MPa)	Rm (MPa)	A% (%)
CuFe0.1P0.03	111 ± 1	385 ± 4	388 ± 4	3.1 ± 0.1
CuFe2.3P0.03	112 ± 1	394 ± 4	397 ± 4	8.9 ± 0.1
CuNi0.27P0.01	106 ± 1	311 ± 3	318 ± 3	10.7 ± 0.1

Tableau 4. 7 : Tôles découpées lors de l'essai de faisabilité et leurs caractéristiques mécaniques

En ce qui concerne la quantité de lubrifiant employé, trois régimes différents ont été choisis. A un régime de référence à 3.3 g/m² d'huile déposée sur les tôles s'ajoutent deux variantes, la première avec 40% d'huile de lubrification en plus, et la seconde avec 40% d'huile en moins. Le *tableau 4.8* résume les différentes configurations de ces essais de découpe.

Configurations	Tôles	Lubrification (g/m ²)
1	Cu0.1Fe0.03P	3.3
2	Cu-2.3Fe-0.03P	3.3
3	Cu-0.1Fe-0.03P	3.3
4	Cu-0.27Ni-0.01P	3.3
5	Cu-0.1Fe-0.03P	3.3
6	Cu-0.1Fe-0.03P	3.3 (-40%)
7	Cu-0.1Fe-0.03P	3.3 (+40%)
8	Cu-0.1Fe-0.03P	3.3

Tableau 4. 8 : Description des différentes configurations de l'essai de faisabilité

A l'issue des mesures effectuées avec cette méthode de suivi, nous obtenons l'évolution de l'usure du poinçon (carbure de tungstène) en fonction du nombre de coups de presse. Une configuration de référence a été répétée tout au long de l'essai afin de vérifier la capacité de la technique de mesure à détecter l'influence des différents paramètres sur la cinétique d'usure du poinçon, ainsi que l'absence d'une influence rémanente d'une variation de la cinétique d'usure lors d'un changement de paramètre de découpe.

Les résultats de ces essais de faisabilité sont présentés sur la *figure 4.3*.

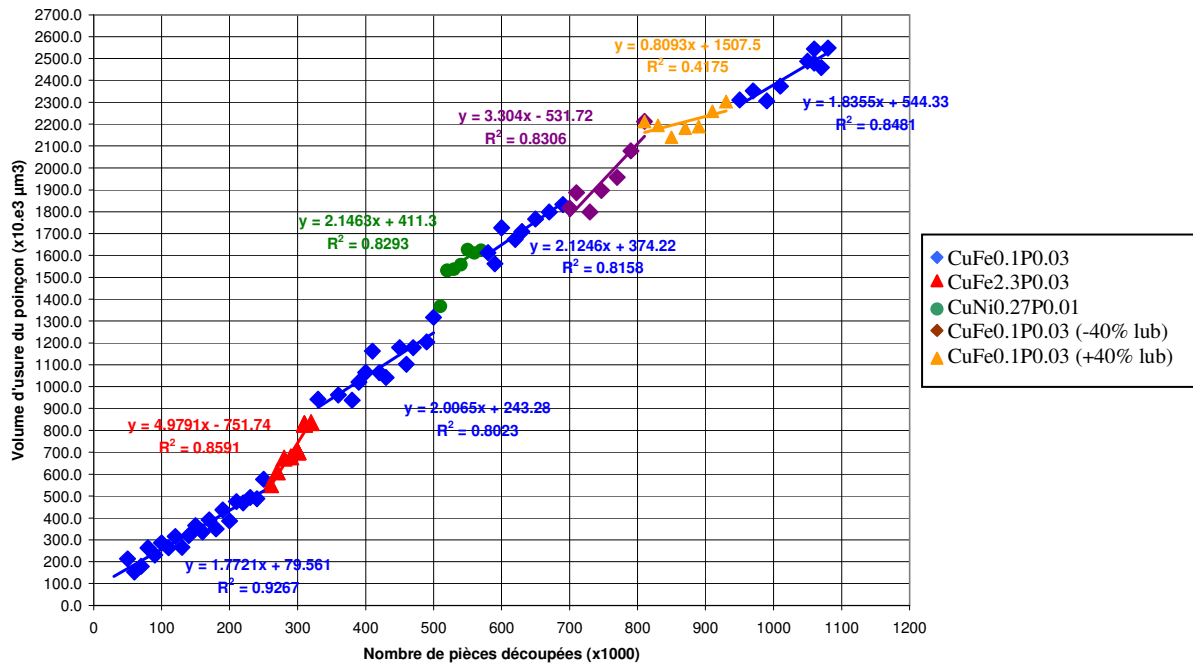


Figure 4.3 : Evolution de l'usure en fonction du nombre de coups de presse

Cette figure montre, entre 0 et 600 000 coups de presse, l'influence de la matière de la tôle sur l'usure du poinçon et la capacité de la technique de mesure à différencier la cinétique d'usure due au changement de la nuance de tôle. Ainsi, on remarque que la découpe de la tôle CuFe2.3P0.03 a eu comme effet l'augmentation de la cinétique d'usure du poinçon, pour atteindre plus du double de la valeur enregistrée lors de la découpe des tôles CuFe0.1P0.03 et CuNi0.2P0.01.

Gréban [Gréban 2006] avait montré que l'alliage CuFe2.3P0.03 se caractérise par un nombre important de précipités de grande taille, contrairement au CuFe0.1P0.03 et au CuNi0.2P0.01, pour lesquels les précipités sont nettement plus petits. Cela pourrait expliquer la différence de cinétique d'usure enregistrée lors de cet essai. Car comme on peut le remarquer dans le tableau 4.7, le CuFe0.1P0.03 et le CuFe2.3P0.03 ont par exemple des seuils élastiques sensiblement équivalents. Donc, les caractéristiques mécaniques ne pourraient pas expliquer l'écart de cinétique d'usure sur le poinçon.

Le tableau 4.9 regroupe l'ensemble des cinétiques d'usure enregistré lors de cet essai expérimental.

Configurations	Tôle	Lubrification (g/m ²)	Cinétique d'usure (μm ³ /coup)
1	Cu0.1Fe0.03P	3.3	1.77
2	CuFe : Cu-2.3Fe-0.03P	3.3	4.97
3	Cu-0.1Fe-0.03P	3.3	2.00
4	CuNiP : Cu-0.27Ni-0.01P	3.3	2.14
5	Cu-0.1Fe-0.03P	3.3	2.12
6	Cu-0.1Fe-0.03P	3.3 (-40%)	3.30
7	Cu-0.1Fe-0.03P	3.3 (+40%)	0.80
8	Cu-0.1Fe-0.03P	3.3	1.83

Tableau 4. 9 : Différentes valeurs de cinétique d'usure enregistrées

Au-delà de 600 000 coups de presse, différentes conditions de lubrification ont été appliquées. Les résultats montrent qu'avec une augmentation de 40% de la quantité d'huile, la cinétique d'usure est environ deux fois moins importante qu'avec le régime de lubrification de référence. Nous observons également que, lors de la découpe sous un régime avec – 40% d'huile, cela induit une usure du poinçon plus sévère par rapport à la configuration de référence.

Au delà des résultats comparatifs de ces essais, il apparaît que la méthode de mesure de l'usure par activation superficielle appliquée au découpage, est une technique qui permet de mesurer l'abrasivité des alliages de cuivre dans les conditions réelles d'utilisation. Malgré le fait que cette méthode soit lourde à mettre en place, elle possède l'avantage de permettre des mesures en continu et ne nécessite pas de démontage de l'outil pour mesurer l'usure du poinçon, limitant ainsi le risque d'ébréchure ou de modifications des conditions de découpe (notamment le centrage du poinçon dans la matrice). De plus, sa sensibilité autorise une mesure discriminante de l'influence des paramètres étudiés.

4.2.2.2. Mesure de l'usure par profilométrie sur les répliques des poinçons

Ces mesures ont été réalisées lors de deux campagnes d'essais effectués avec des poinçons en carbure de tungstène (nuance H20S), usinés par rectification cylindrique pour le premier et par usinage par fil pour le deuxième (diamètre 3.7mm). Le jeu poinçon / matrice est de 10 μm par face. La cadence de découpe est de 500 coups/min. Le pas de l'outil est de 4.5 mm, la course de la presse est de 19 mm et le grammage moyen du lubrifiant est de 2 g/m². Les matrices possèdent chacune un angle de dépouille de 18°.

Comme indiqué dans le troisième chapitre, la méthode de mesure dite mesure par profilométrie sur réplique du poinçon est basée sur l'obtention de répliques des poinçons par duplication par moulage au silicone. Ce type de duplication permet de disposer en quelques

heures d'une réplique des poinçons par moulage. Le principe de mesure est facilité par la géométrie des poinçons qui présentent l'avantage d'être cylindrique.

Le protocole de mesure est construit autour du relevé de la géométrie du poinçon utilisé. Ce relevé donne la distribution de l'usure le long de l'arête de découpe. Un exemple de profil usé du poinçon 1 après 588 000 coups de presse est présenté sur la figure 4.4.

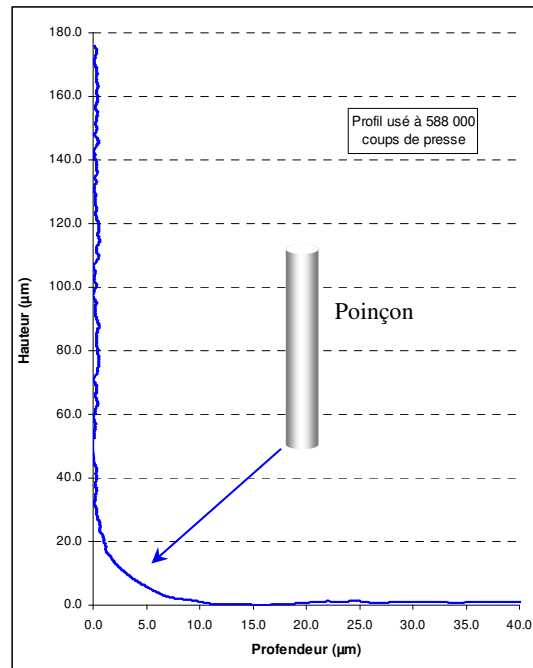


Figure 4. 4 : Profil usé sur l'arête de découpe à 588 000 coups de presse

On peut voir sur cette figure la partie arrondie usée du poinçon. En dehors de la zone de l'arrondi de l'arête se trouvent les stries correspondant à l'usinage du poinçon. Ces deux zones renvoient à la hauteur et à la profondeur du poinçon. C'est donc sur les zones striées, et non usées que sont pris les points de référence permettant de recaler le profil 2D en abscisse et en ordonnée, afin de réaliser la mesure de l'usure du poinçon.

Une fois le profil d'usure d'une réplique du poinçon obtenu pour un état d'usure donné, un calcul d'usure est effectué en se basant sur ces données. La mesure est réalisée en utilisant le théorème de calcul du volume d'un corps de révolution autour d'un axe.

En effet, calculer le volume d'un corps de révolution engendré par la rotation d'un profil autour d'un axe (figure 4.5) est une des tâches effectuées par calcul intégral. Si le profil est donné par une fonction $y = f(x)$ avec x variant entre a et b , le volume du corps se calcule à l'aide d'une intégrale définie par la relation :

$$V = \int_a^b \pi \times y^2 \times dx \quad (4.1)$$

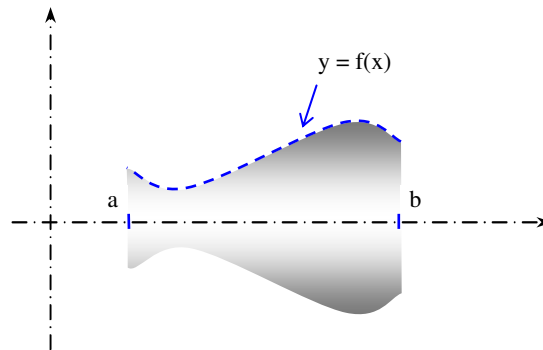


Figure 4. 5 : Représentation du volume d'un corps de révolution autour d'un axe

Appliqué à notre cas, ce théorème permet la détermination du volume de matière perdue par usure sur le poinçon (*figure 4.6*). Il pourra être approché par le volume du corps engendré par la rotation du profil d'usure autour de l'axe des ordonnées (*figure 4.7*). Cela en admettant l'hypothèse que l'usure est homogène sur le contour du poinçon.

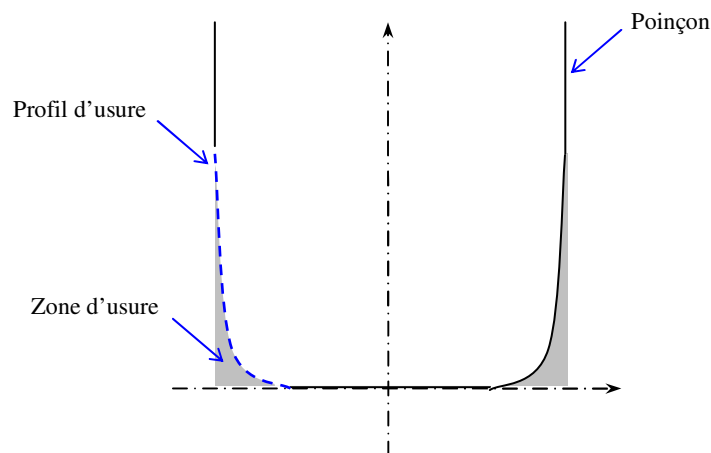


Figure 4. 6 : Profil et zone d'usure sur le poinçon

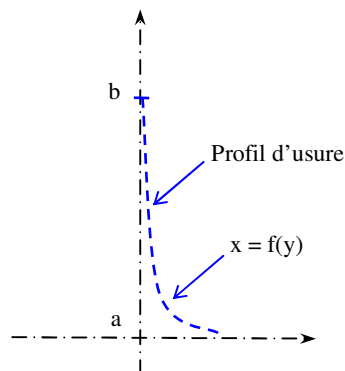


Figure 4. 7 : Profil de calcul du volume d'usure

Le protocole de calcul d'un volume d'usure en utilisant un profil du bord tranchant du poinçon se divise en deux grandes étapes ; premièrement une équation de type $x = f(y)$ est associée à ce profil, afin de le modéliser et prendre en compte le fait que le calcul sera réalisé par rotation autour de l'axe des ordonnées. Par la suite l'identification du volume d'usure sur la réplique est effectuée par calcul du volume du corps de révolution généré par l'équation modèle autour de l'axe des ordonnées par la relation :

$$V = \int_a^b \pi \times x^2 \times dx \quad (4.2)$$

Avec : $a = 0$ et b = valeur de l'intersection entre le profil et l'axe des ordonnées, (= valeur maximale de la hauteur de l'usure pour le profil concerné).

4.2.2.2.1. Influence de la nuance de tôle découpée

Dans ce paragraphe, nous allons étudier l'influence de la composition de l'alliage de cuivre sur l'usure des poinçons. En effet, l'usure dépend tout autant des conditions mécaniques et thermiques imposées par le contact que des matériaux en contact. Les paramètres caractérisant la microstructure des matières (taille des grains, précipités, ...) ont leur rôle sur l'usure des poinçons de découpe.

a. Première campagne d'essais

Lors de la première campagne d'essais, une des configurations étudiées concerne l'influence du matériau découpé sur la cinétique de l'usure du poinçon utilisé pour la découpe. Afin de réaliser cette étude, nous avons sélectionné trois nuances d'alliages cuivreux employées traditionnellement par le secteur des composants électroniques et qui sont comparées à la nuance de référence de nos essais :

- ↪ CuSn6 ; H12,
- ↪ CuNi3Si ; H12,
- ↪ CuNi18Zn20 ; H12,
- ↪ CuFe0.1P0.03 ; H12 (nuance de référence).

Compte tenu des résultats de l'étude de faisabilité de la méthode de mesure dite par « double réplique » (voir chapitre 3), nous avons décidé de découper chaque nuance de tôle

durant 50 000 coups de presse pour mesurer l'influence du matériau découpé sur l'usure du poinçon.

Il faut noter que les épaisseurs des tôles découpées ici sont différentes (0.2 et 0.254mm). L'effet de l'épaisseur sera évalué dans la deuxième campagne d'essais, permettant de corriger les écarts d'épaisseur des tôles utilisées ici.

Les pentes (vitesses d'usure) obtenues avec la nuance de référence sur trois séries distinctes de 50 000 coups de presse, permettent d'estimer la précision de mesure obtenue. L'incertitude sur la pente est alors de $\pm 0.21 \mu\text{m}^3/\text{coups de presse}$ ($\pm 2 \times \text{écart type}$).

Les résultats obtenus (figure 4.8) sont résumés dans le tableau 4.10.

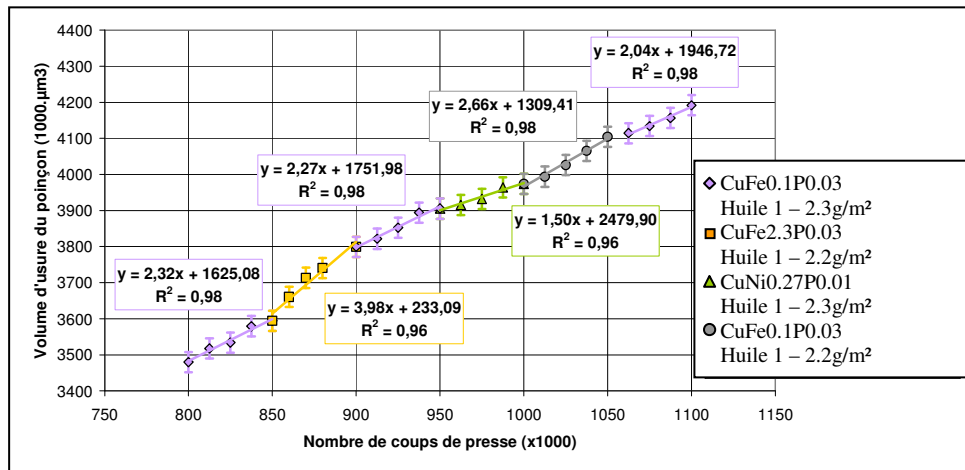


Figure 4. 8 : Influence de la nuance découpée sur l'usure du poinçon (essai 1)

Nuances des tôles	Dureté (Hv)	Epaisseur (mm)	Vitesse d'usure du poinçon ($\mu\text{m}^3/\text{coups de presse}$)
CuFe0.1P0.03	120	0,254	2,21 +/- 0,21
CuSn6	190	0,2	3,98 +/- 0,21
CuNi18Zn20	185	0,2	1,50 +/- 0,21
CuNi3Si	240	0,2	2,66 +/- 0,21

Tableau 4. 10 : Influence de la nuance de matière découpée sur l'usure du poinçon (essai 1)

Un indice d'abrasivité a été proposé pour comparer l'effet de la nuance de la tôle découpée sur l'usure du poinçon (tableau 4.11). Cet indice représente l'abrasivité des tôles découpées comparée à la nuance référence CuFe0.1P0.03 (dureté 120Hv, 0.254mm d'épaisseur), il est calculé en divisant la vitesse d'usure obtenue par la vitesse d'usure de la matière de référence.

Nuances des Tôles	Dureté (Hv)	Epaisseur (mm)	Indice d'abrasivité
CuFe0.1P0.03	120	0,254	1
CuSn6	190	0,2	1,80 +/- 0.07
CuNi18Zn20	185	0,2	0,68 +/- 0.07
CuNi3Si	240	0,2	1,20 +/- 0.07

Tableau 4. 11 : Indice d'abrasivité des tôles découpées (+/- 2 σ) (essai 1)

Il apparaît dans *le tableau 4.11*, que le bronze CuSn6 est nettement plus abrasif que les autres nuances découpées, le nombre de pièces découpées pour un niveau d'usure équivalent est alors presque deux fois plus faible, que pour la nuance CuFe0.1P0.03.

On note que la précision obtenue sur les indices d'abrasivité est satisfaisante par rapport aux écarts enregistrés, ce qui valide les conditions des essais.

Ces résultats seront analysés à la lumière des examens métallographiques des nuances utilisées, ceci afin d'identifier les paramètres métallurgiques à l'origine des écarts d'abrasivité. Pour ce faire, un regroupement de ces résultats avec ceux de la deuxième campagne d'essais concernant l'influence de la nuance des tôles sur l'usure du poinçon sera réalisé dans le paragraphe 4.2.2.2.2.

b. Deuxième campagne d'essais

L'influence de la matière découpée sur l'usure du poinçon a été également observée lors de la deuxième campagne d'essais. Au cours de ces essais, 5 nuances sont comparées à la matière de référence, CuFe0.1P0.03. Il s'agit des alliages (*tableau 4.12*) :

- ↵ CuZn33, H12,
- ↵ CuAl, H12,
- ↵ CuBe2, ½ H,
- ↵ CuBe2 prétraité
- ↵ CuSn3Zn9, H12,

Nuances des tôles	Etat des tôles	Dureté (Hv)	Epaisseur (mm)
CuFe0.1P0.03	H12	120	0,254
CuZn33	H12	110	0.25
Cua1	H12	100	0.25
CuBe2	½ H	180	0.25
CuBe2	prétraité	400	0.25
CuSn3Zn9	H12	200	0.25

Tableau 4. 12 : Caractéristiques des matières découpées (essai 2)

Les résultats obtenus lors de ces essais sont représentés dans la figure 4.9.

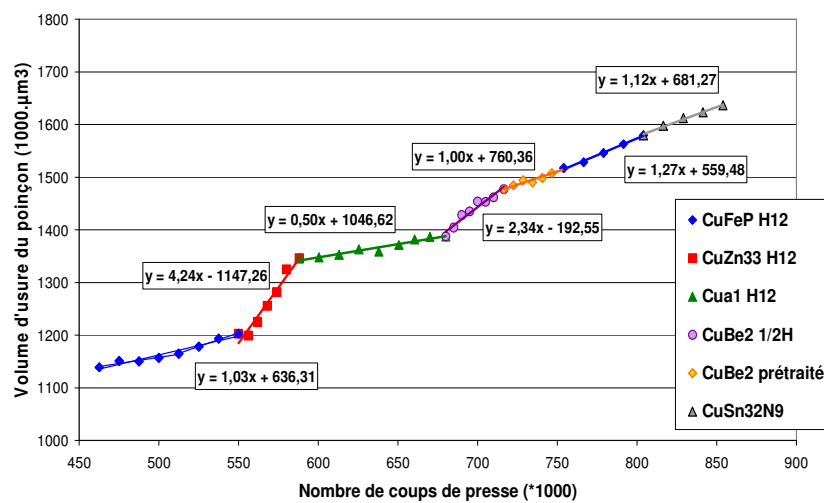


Figure 4. 9 : Influence de la nuance de matière découpée sur l'usure du poinçon (essai 2)

A partir des résultats expérimentaux (figure 4.9), il est possible de calculer un indice d'abrasivité des tôles découpées. Celui-ci est donné dans le tableau 4.13.

Nuances des tôles	Etat des tôles	Dureté (Hv)	Epaisseur (mm)	Vitesse d'usure du poinçon (µm³/coups de presse)	Indice d'abrasivité
CuFe0.1P0.03	H12	120	0,254	1.2	1
CuZn33	H12	110	0.25	4.24	3.53
Cua1	H12	100	0.25	0.5	0.42
CuBe2	H12	180	0.25	2.34	1.95
CuBe2	prétraité	400	0.25	1	0.83
CuSn3Zn9	H12	200	0.25	1.12	0.93

Tableau 4. 13 : Indice d'abrasivité des nuances de tôle découpées (essai 2)

Il apparaît dans le *tableau 4.13*, que c'est le laiton CuZn33 qui possède le plus de pouvoir abrasif sur le poinçon en carbure de tungstène. Le nombre de pièces découpées avec cette nuance, pour un niveau d'usure équivalent est alors plus de trois fois plus faible, que pour la nuance CuFe0.1P0.03.

De même qu'avec les nuances de la première campagne d'essais, les tôles de la deuxième campagne ont subi également des examens métallographiques visant à révéler la microstructure des tôles. Ces analyses seront présentées pour l'ensemble des tôles de ces deux campagnes d'essai dans le paragraphe 4.2.2.2.3.

4.2.2.2.2. Influence de l'épaisseur de la tôle découpée

Au cours de la deuxième campagne d'essais, nous avons également mesuré l'influence de l'épaisseur de la tôle découpée sur l'usure du poinçon. Les résultats des essais sont portés sur les *figures 4.10 et 4.11*.

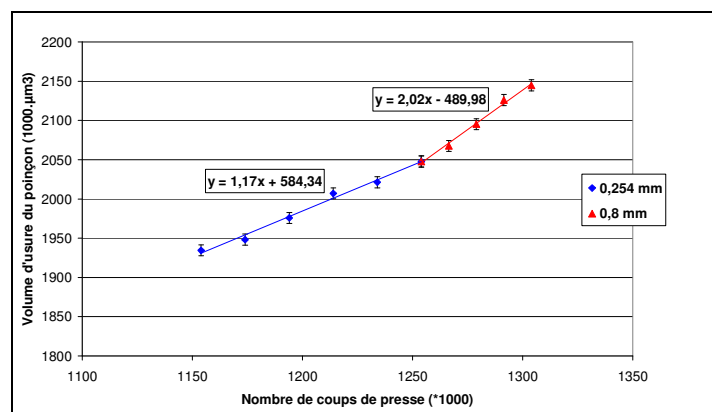


Figure 4. 10 : Influence de l'épaisseur de la tôle découpée sur l'usure du poinçon (essai 2)

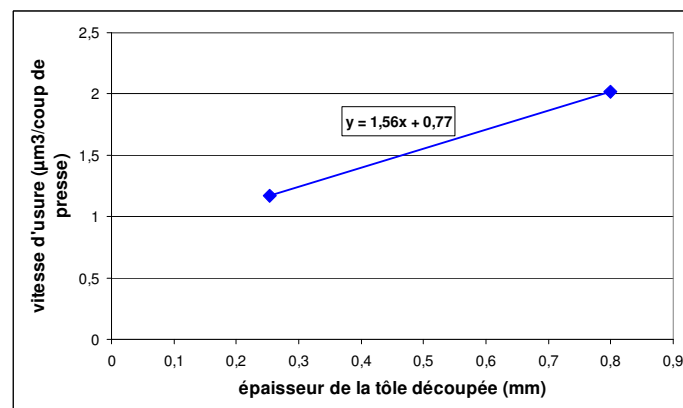


Figure 4. 11 : Influence de l'épaisseur de la tôle découpée sur la vitesse d'usure du poinçon (essai 2)

A l'aide des résultats *des figures 4.10 et 4.11*, il est possible de corriger l'ensemble des calculs d'indice d'abrasivité (des deux campagnes d'essais). En effet, les tôles découpées ont une épaisseur différente, les résultats sont donc corrigés en conséquence (*tableau 4.14*).

Le mode de correction de l'épaisseur de la tôle sur la vitesse d'usure est bien évidemment arbitraire. En effet, il n'était pas possible de disposer de toutes les nuances de tôles dans la même épaisseur d'une part, et d'autre part il n'était également pas possible d'avoir une même nuance de tôle dans une palette d'épaisseurs suffisante pour en étudier l'influence en détails.

Nuances des tôles	Etat des tôles	Dureté (Hv)	Indice d'abrasivité
CuFe0.1P0.03	H12	120	1
CuSn6	H12	190	1.84
CuNi18Zn20	H12	185	0.72
CuNi3Si	H12	240	1.24
CuZn33	H12	110	3.53
Cua1	H12	100	0.42
CuBe2	½ H	180	1.95
CuBe2	prétraité	400	0.83
CuSn3Zn9	H12	200	0.93

Tableau 4. 14 : Indice d'abrasivité des nuances découpées dans les deux campagnes d'essais, corrigé de l'effet de l'épaisseur de la tôle

D'après les valeurs des indices d'abrasivité des tôles présentées dans *le tableau 4.14*, on constate que le laiton CuZn33 est le plus abrasif de tous les alliages testés, suivi par les deux nuances CuBe ½ H et CuSn6. Si ces trois nuances se démarquent par leur effet néfaste sur le poinçon, qui s'use rapidement en découpant ces tôles, la nuance Cua1 est celle qui est la moins abrasive vis-à-vis du poinçon.

4.2.2.2.3. Microstructure des tôles découpées

Pour tenter de comprendre les raisons de la différence d'abrasivité entre les nuances de tôles découpées, la microstructure des alliages cuivreux a été étudiée par micrographie électronique à balayage (MEB), et également par micrographie électronique en transmission (MET), permettant une caractérisation plus fine de la microstructure.

A noter que les alliages étudiés sont des matériaux industriels, contenant de nombreux éléments métalliques.

a. Cua1

Le Cua1 (*figure 4.12*) est un cuivre pur avec une teneur en cuivre supérieure à 99.9% (% en poids). L'analyse micrographique de la structure de cet alliage montre la présence d'oxydules.

Ce résultat est également confirmé par les clichés MEB réalisés après révélation de la structure de la nuance Cua1 (*figure 4.13*). On constate aussi la présence de bandes de déformation sur les grains suivant les directions de glissement.

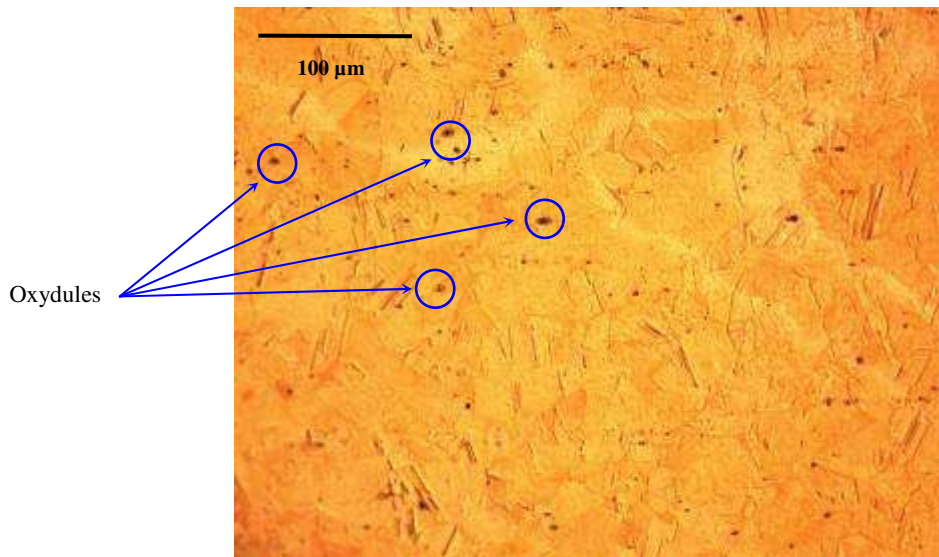


Figure 4. 12 : Structure micrographique du Cua1 avec oxydules

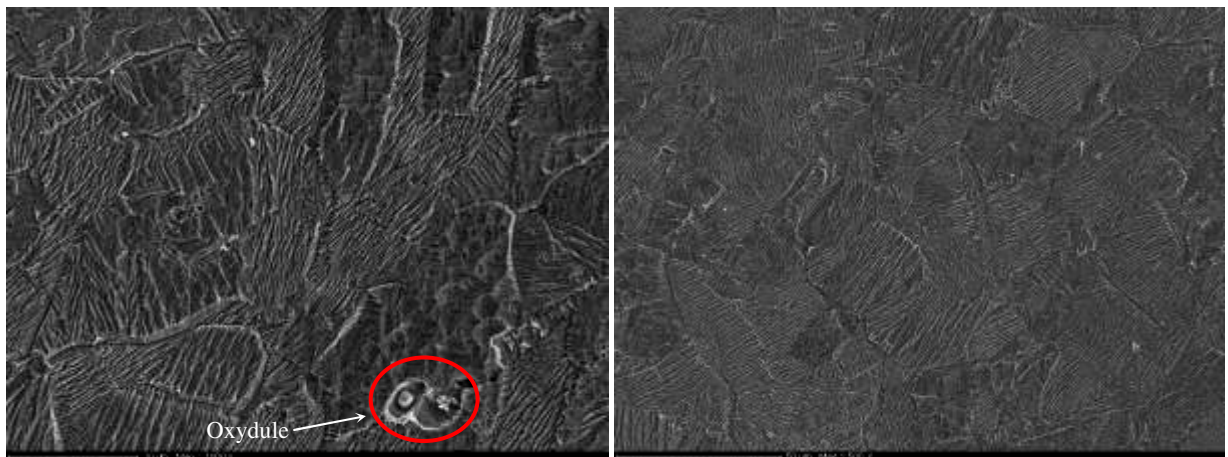


Figure 4. 13 : Micrographies électroniques à balayage du Cua1 H12 (grossissements x1000, x500)

Les grains de cuivre du Cu1 sont ici d'une taille de l'ordre de 26 μm . D'autre part, les analyses MET sur cette nuance révèlent l'absence de précipités.

b. CuZn33

La taille des grains de l'alliage CuZn33 est de l'ordre de 7 μm (*figure 4.14*). Les micrographies électroniques en transmission mettent en évidence le fait que les précipités sont nombreux et présents dans les grains, pas aux joints. Ils sont en général de forme sphérique voire de forme légèrement ellipsoïdale (*figure 4.15*).

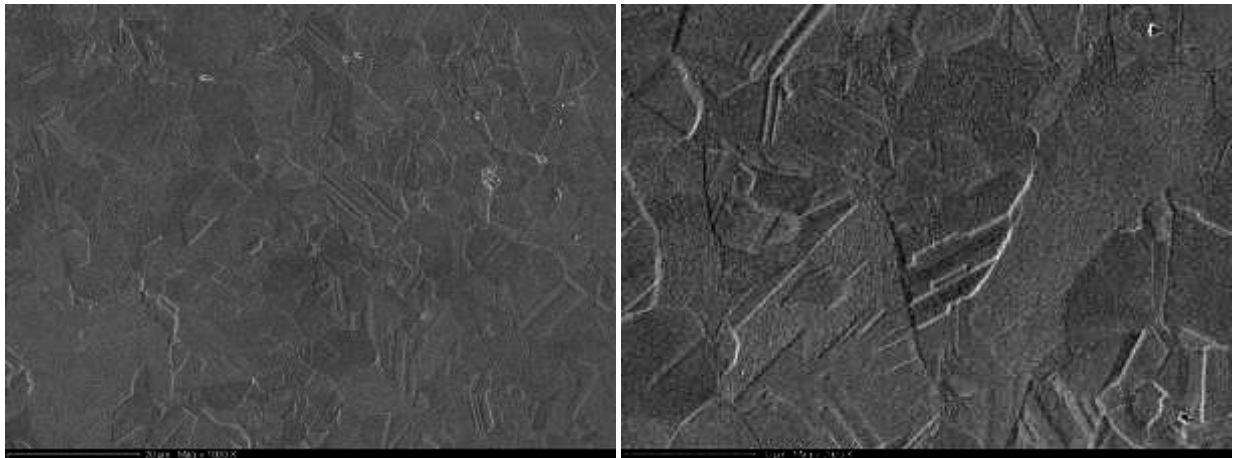


Figure 4. 14 : Micrographies électroniques à balayage du CuZn33 H12 (grossissements $\times 1000$, $\times 2000$)

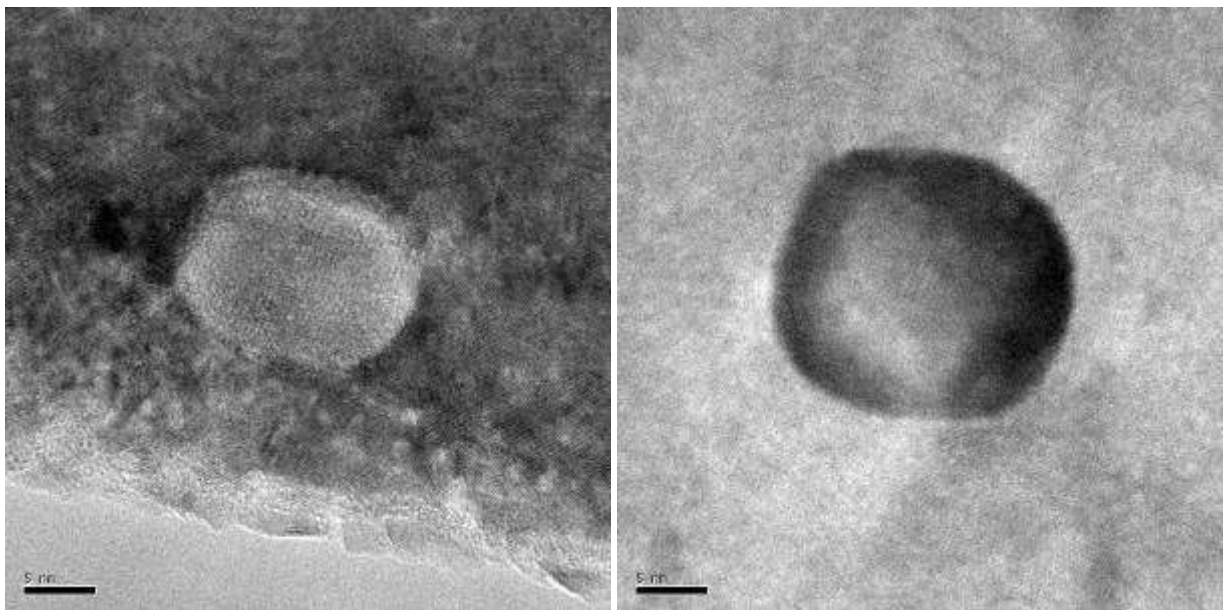


Figure 4. 15 : Micrographie électronique en transmission du CuZn33

La taille des précipités s'échelonne entre 13 et 100 nm pour l'alliage CuZn33, avec un diamètre moyen d'environ 55 nm. La phase cristallographique des précipités correspond au fer cubique centré (bainite/ferrite). L'analyse MET pour le CuZn33 indique donc la présence de précipités de fer pur.

c. CuBe2 ½ H

L'alliage CuBe2 ½ H est caractérisé par la présence de macles dans sa structure (*figure 4.16*). La taille des grains de l'alliage CuBe2 ½ H est de l'ordre de 25 µm (*figure 4.17*).

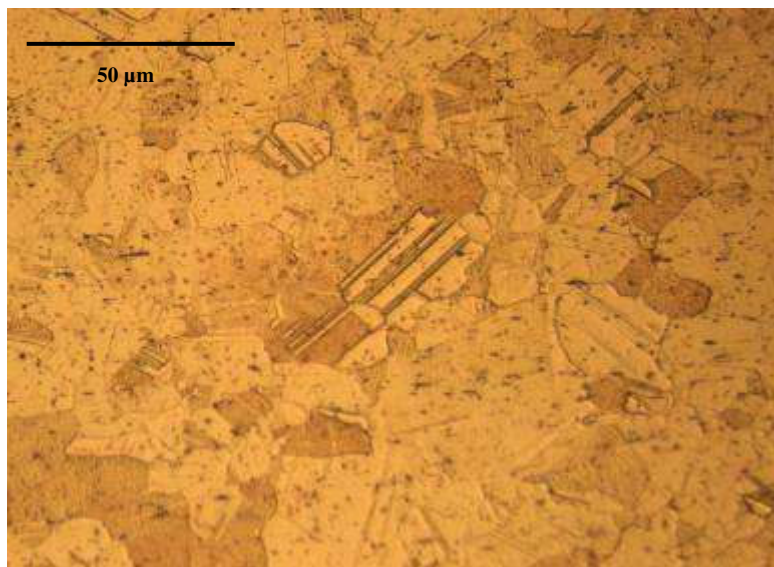


Figure 4. 16 : Structure micrographique du CuBe2 ½ H avec macles

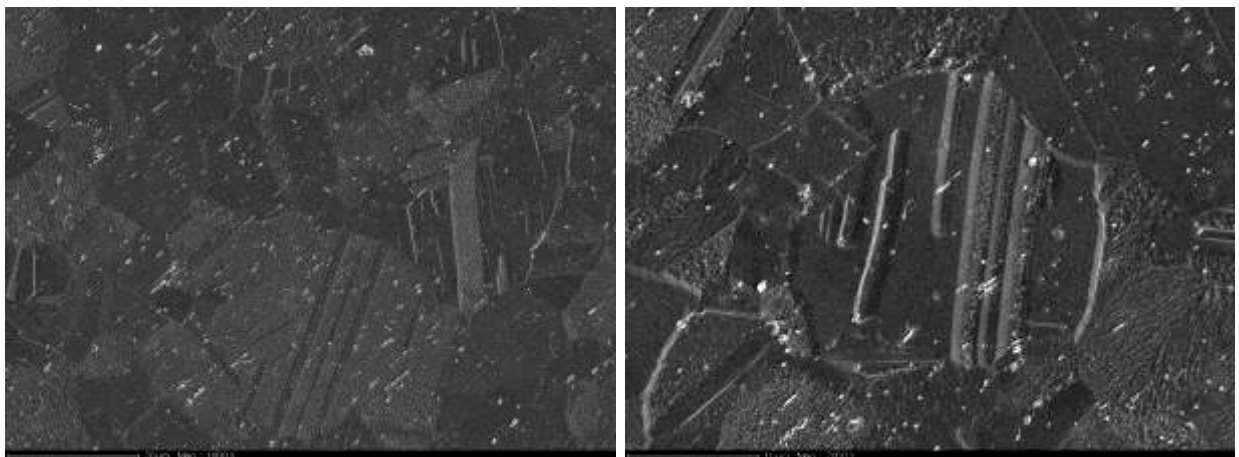
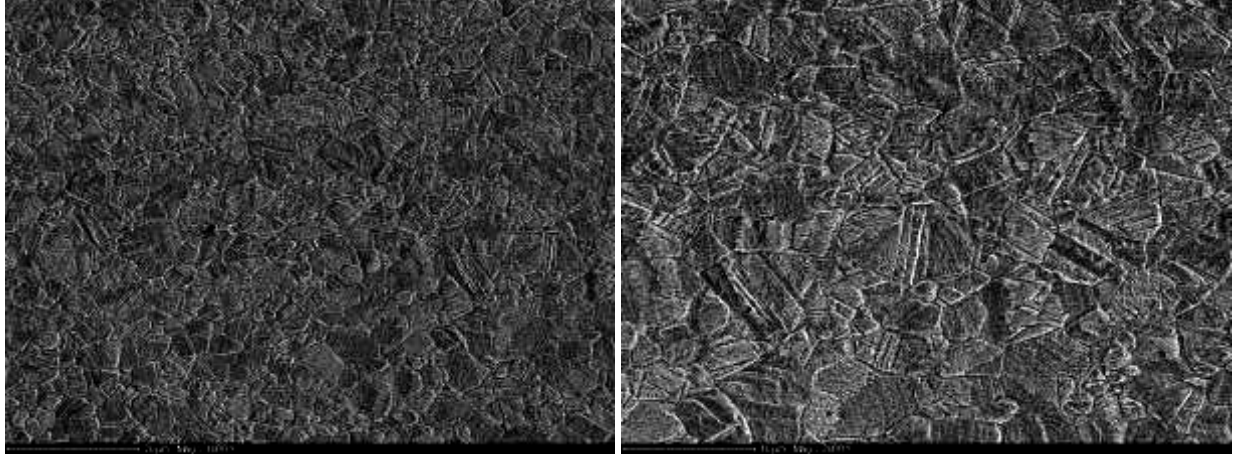


Figure 4. 17 : Micrographies électroniques à balayage du CuBe2 ½ H (grossissements x1000, x2000)

d. CuSn6

L'alliage CuSn6 est également caractérisé par la présence de macles dans sa structure (*figure 4.18*). La taille des grains est de l'ordre de 4 μm .



**Figure 4. 18 : Micrographies électroniques à balayage du CuSn6
(grossissements x1000, x2000)**

e. CuNi3Si

Sur les micrographies de la structure de l'alliage CuNi3Si (*figure4.19*) on constate que les grains sont allongés signe d'un fort écrouissage.

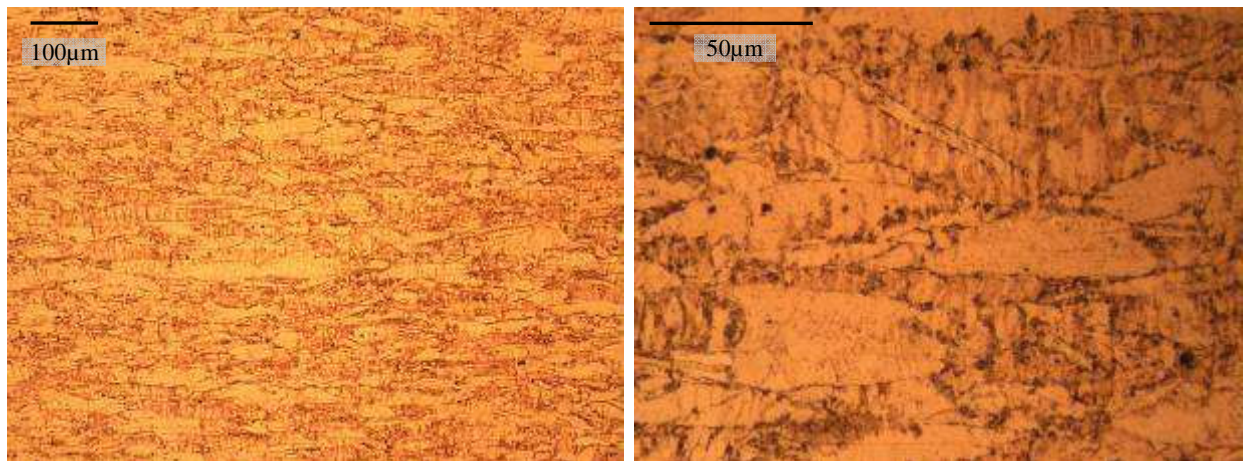
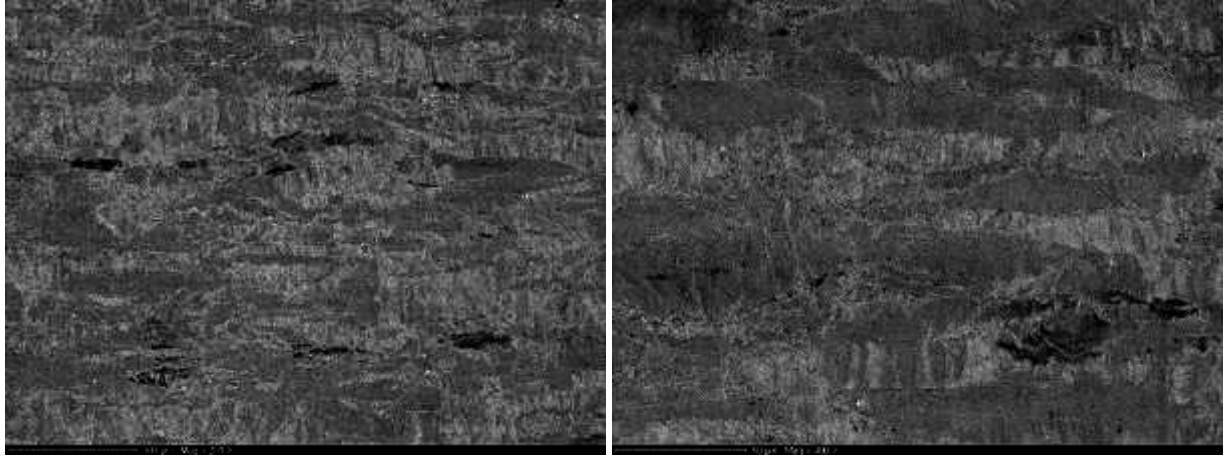


Figure 4. 19 : Structure micrographique du CuNi3Si

La micrographie électronique à balayage du CuNi3Si (*figure 4.20*) montre que les grains allongés ont une taille qui approche les 70 μm environ.



*Figure 4. 20 : Micrographies électroniques à balayage du CuNi3Si
(grossissements x200, x400)*

De plus l'analyse MET de cette nuance (*figure 4.21*) révèle la présence de précipités (Ni, Si) aux joints de grains. Ces précipités sont de tailles différentes allant de 15 à 70 nm.

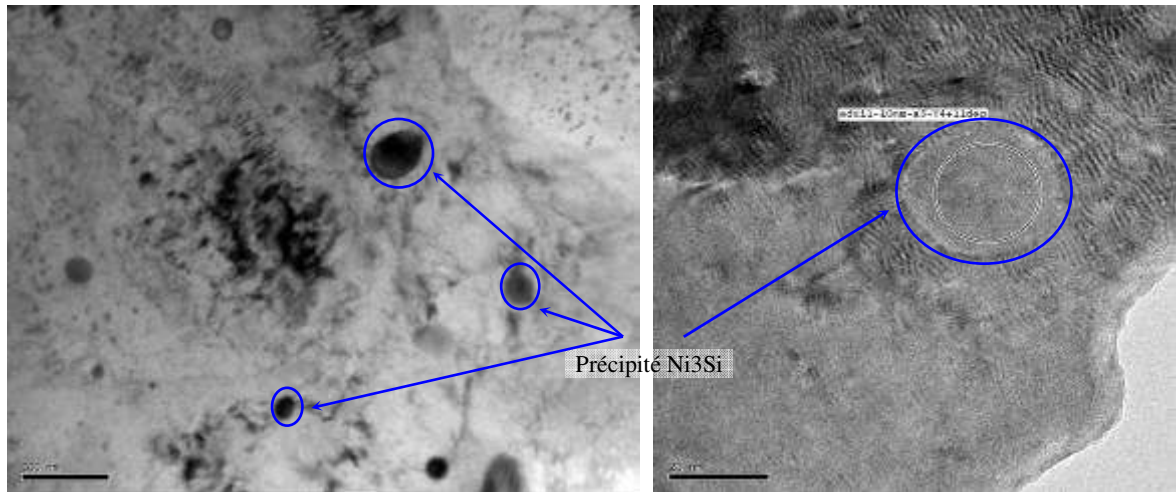


Figure 4. 21 : Micrographie électronique en transmission du CuNi3Si

f. CuFe0.1P0.03

L'alliage CuFe0.1P0.03 est la nuance de référence de nos essais. Les micrographies électroniques à balayage du CuFe0.1P0.03 (*figure 4.22*) montrent une taille de grains de l'ordre de 12 μm .

L'analyse de cet alliage au microscope électronique en transmission (MET) (*figure 4.23*), montre la présence des précipités métalliques (Fe₂P) de tailles variables (35 à 137nm).

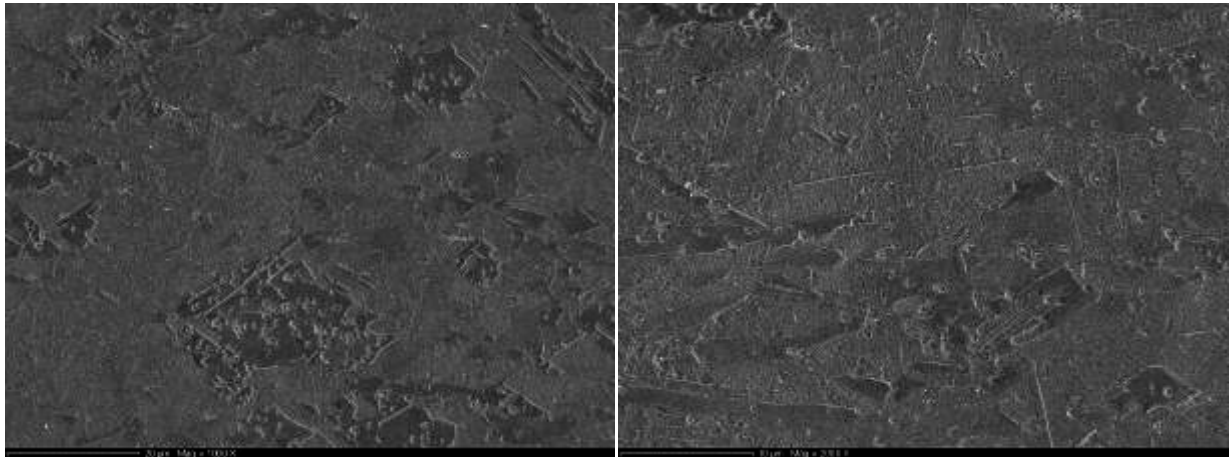


Figure 4. 22 : Micrographies électroniques à balayage du CuFe0.1P0.03 (grossissements x1000, x2000)

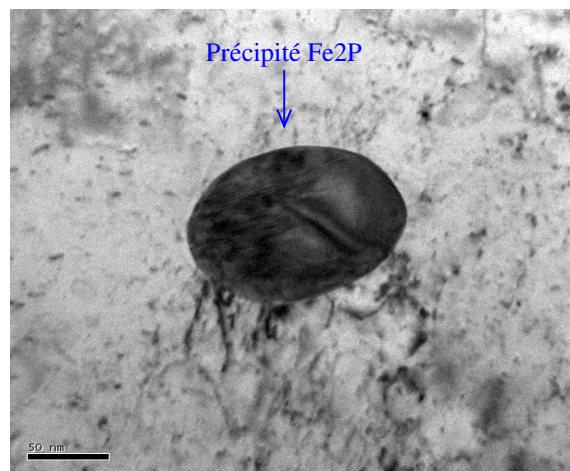


Figure 4. 23 : Micrographie électronique en transmission du CuFe0.1P0.03

g. CuSn3Zn9

La taille de grains de la nuance CuSn3Zn9 est de l'ordre de 8 μm (figure 4.24).

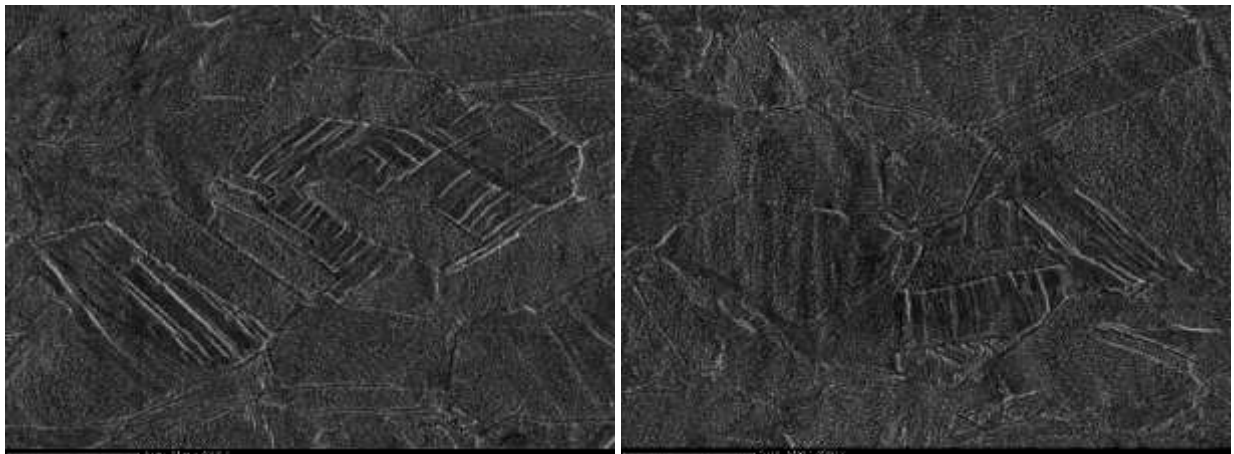


Figure 4. 24 : Micrographies électroniques à balayage du CuSn3Zn9 (grossissements x4000, x4000)

On remarque également sur ces micrographies la présence de macles dans la structure de l'alliage CuSn3Zn9.

h. CuBe2 (prétraité)

Les micrographies électroniques à balayage montrent une taille de grains de l'ordre de $19\ \mu\text{m}$ pour la nuance CuBe2 (prétraité) (*figure 4.25*). La structure révèle également la présence de macles.

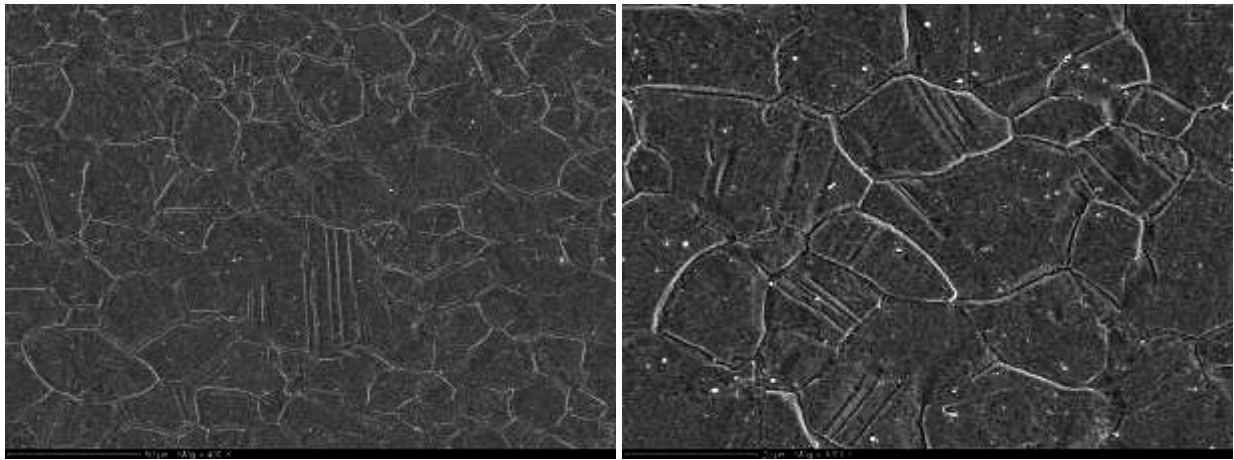


Figure 4. 25 : Micrographies électroniques à balayage du CuSn3Zn9 (grossissements x400, x1000)

i. CuNi18Zn20

Les analyses au microscope électronique en transmission sur la nuance d'alliage CuNi18Zn20 n'ont pas permis de détecter la présence de précipités dans la microstructure. Ils ne sont ni présents dans les grains ni aux interfaces dans les joints de grains.

j. Bilan

La microstructure des alliages découpés lors de nos essais expérimentaux a été étudiée par micrographie électronique à balayage et en transmission. Les valeurs d'espacement entre particules sont à considérer à titre indicatif compte tenu de la difficulté à les estimer en raison du niveau d'écrouissage des alliages. Les valeurs de leur abrasivité sont notées dans *le tableau 4.15* du plus abrasif ou moins abrasif.

	Nuances des tôles	Etat des tôles	Dureté (Hv)	Indice d'abrasivité
1	CuZn33	H12	110	3.53
2	CuBe2	½ H	180	1.95
3	CuSn6	H12	190	1.84
4	CuNi3Si	H12	240	1.24
5	CuFe0.1P0.03	H12	120	1
6	CuSn3Zn9	H12	200	0.93
7	CuBe2	prétraité	400	0.83
8	CuNi18Zn20	H12	185	0.72
9	CuAl	H12	100	0.42

Tableau 4. 15 : Indice d'abrasivité des nuances découpées dans les deux campagnes d'essais

Le tableau 4.16 rappelle les caractéristiques mécaniques de l'ensemble des tôles découpées lors de nos essais. Elles sont présentées dans l'ordre de leur abrasivité, de la plus abrasive à la moins abrasive.

	Tôles	Module de Young (GPa)	Limite élastique 0.2% (MPa)	Charge de rupture (MPa)	A (%)
1	CuZn33	100	360	430	22
2	CuBe2 (½ H)	130	980	635	15
3	CuSn6	91	400	500	20
4	CuNi3Si	140	660	720	7
5	CuFe0.1P0.03	121	375	355	10
6	CuSn3Zn9	112	440	510	15
7	CuBe2 (prétraité)	138	1195	1350	4
8	CuNi18Zn20	102	224	370	20
9	CuAl	95	250	350	14

Tableau 4. 16 : Caractéristiques mécaniques des nuances testées

Les grains de cuivre du CuAl, la nuance la moins abrasive vis-à-vis du poinçon, sont ici plus gros que ceux des autres alliages étudiés, de l'ordre de 26 µm. Cette nuance de cuivre n'est pas durcie par l'ajout d'élément d'addition. Alors que le CuZn33, la nuance qui possède le plus de précipités, donne l'abrasivité la plus importante de nos essais.

On note cependant que les caractéristiques mécaniques, et particulièrement la dureté (Hv), ne semblent pas permettre une relation directe avec la cinétique d'usure du poinçon, comme on pouvait l'attendre.

Un autre paramètre semble avoir une influence sur l'usure des poinçons, il s'agit de la taille des grains des alliages des tôles. Gréban [Gréban 2006] a dénombré plusieurs techniques

de durcissement des alliages cuivreux ; parmi ces celles-ci il cite la diminution de la taille de grains.

Ainsi, en regardant de près la taille de grains des différents alliages découpés lors de notre étude, il semble que la conjugaison de la petite taille de grains et la présence de précipités augmente l'abrasivité des nuances des alliages de cuivre.

Ces constatations montrent que le durcissement par précipitation qui est largement utilisé dans les alliages de cuivre (car il permet d'améliorer considérablement les caractéristiques mécaniques tout en sauvegardant la conductivité électrique), contribue à accélérer considérablement l'usure des poinçons lors des opérations de découpe.

4.2.2.2.4. Influence de la quantité d'huile déposée

Lors de l'étude de l'influence de la quantité d'huile déposée sur les tôles découpées dans la première campagne d'essais, le système de lubrification employé utilise des rouleaux imbibés (*système Raziol*, *figure 4.26*) afin de déposer l'huile sur une tôle à découper.



Figure 4. 26 : Système Raziol de lubrification des tôles

La quantité d'huile déposée sur les tôles est alors mesurée régulièrement par pesée : prélèvement d'un échantillon d'un mètre de longueur environ et pesée avant et après dégraissage à l'alcool dans un bain d'ultrasons.

Pour mesurer l'effet de la quantité d'huile sur l'usure du poinçon, le nombre de coups de presse par essai est doublé, soit 100 000 coups. Ceci afin de rendre négligeable l'effet d'inertie, provoqué par le temps d'imbibition des rouleaux de lubrifiant, sur la quantité d'huile déposée sur la tôle. Les résultats de l'essai sont donnés par *la figure 4.27*.

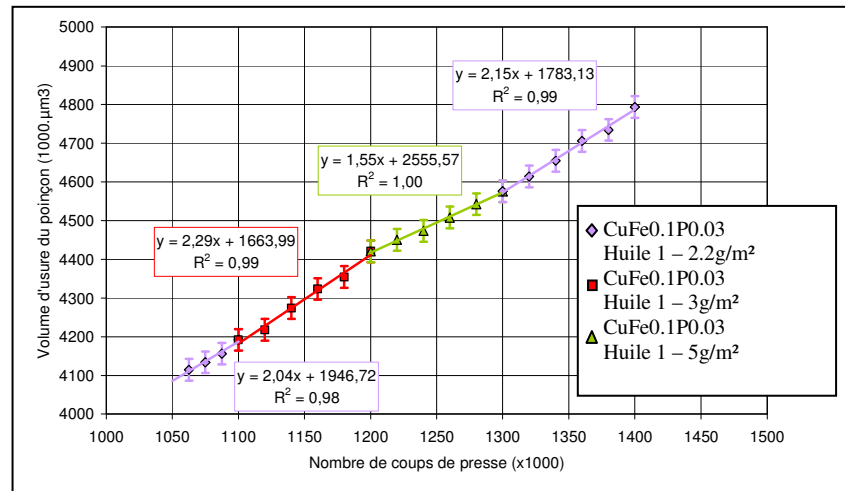


Figure 4. 27 : Influence sur l'usure du poinçon de la quantité d'huile sur la tôle (Huile 1) (essai 1)

A partir des résultats de la figure 4.27, on peut calculer l'influence du grammage d'huile déposée sur la bande, sur la vitesse d'usure du poinçon. On obtient alors la courbe de la figure 4.28, pour laquelle la pente de variation de la vitesse d'usure en fonction du grammage d'huile déposée est de $-0.23 (\mu m^3/\text{nbre de coups de presse})/(g/m^2)$.

Ceci n'est qu'une approximation par une courbe de tendance, car nous ne disposons pas, là encore, de suffisamment de résultats.

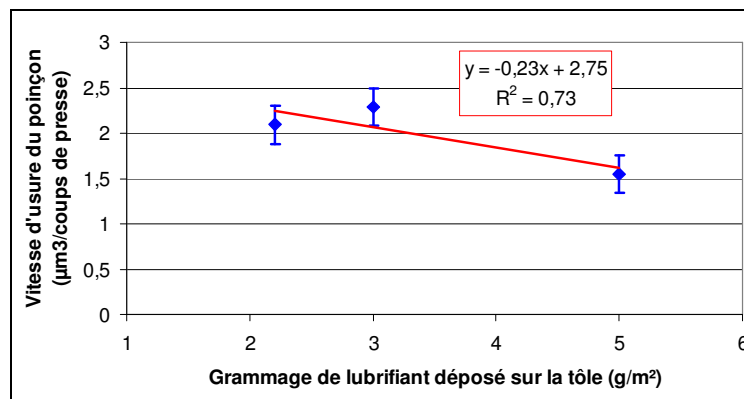


Figure 4. 28 : Influence de la quantité d'huile déposée sur la bande sur la vitesse d'usure du poinçon (huile 1) (essai 1).

Ainsi, on en déduit qu'à usure équivalente, 14% de pièces supplémentaires seront découpées par gramme d'huile supplémentaire par mètre carré déposé sur la bande, pour des grammages compris entre 2 et 5 g/m².

4.2.2.2.5. Influence de la nature du lubrifiant

Dans la continuité de l'étude de l'influence de la quantité d'huile sur l'usure d'un poinçon, lors de la première campagne d'essais, nous avons introduit un élément concernant l'influence de la nature du lubrifiant employé. Dans cet essai, trois nuances d'huile sont comparées à l'huile utilisée comme huile de référence. Les principales données techniques des huiles étudiées sont mentionnées dans le *tableau 4.17*.

Nuance de lubrifiant	Type	Viscosité (mm ² /s à 40°C)	Masse volumique (g/l)
HUILE 1 (huile référence)	Huile minérale raffinée avec additif	8	850
HUILE 2	Lubrifiant évanescent	1,5	790
HUILE 4	Huile entière avec additif pour métaux non ferreux	31	893
HUILE 3	Huile entière biodégradable d'origine végétale	47	920

Tableau 4. 17 : Données techniques des lubrifiants étudiés

Pour chaque nuance d'huile, 100 000 coups de presse ont été effectués. Une mesure de la quantité d'huile sur la tôle est réalisée en milieu et en fin d'essai. Les résultats obtenus sont illustrés par la *figure 4.29* et sont résumés dans le *tableau 4.18*.

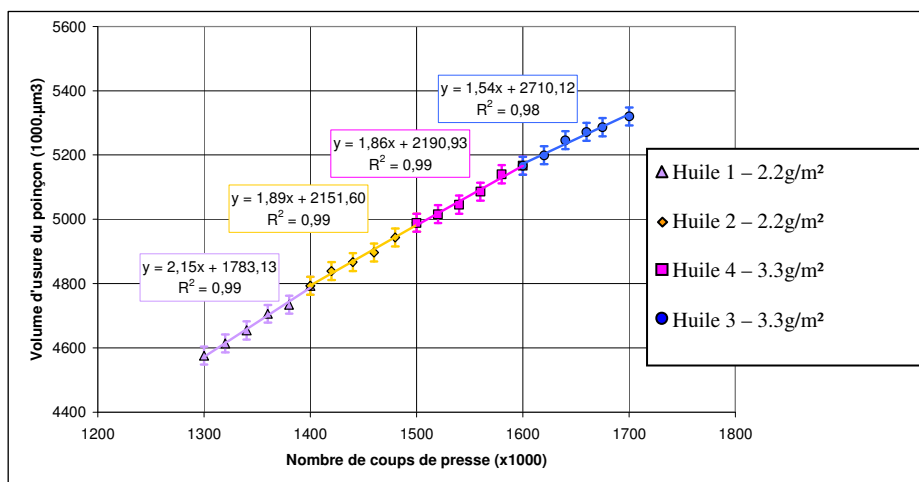


Figure 4. 29 : Influence de la nature de lubrifiant utilisé sur l'usure du poinçon

Nuance de lubrifiant	Grammage déposé sur la tôle (g/m ²)	Vitesse d'usure du poinçon (μm ³ /coups de presse)
HUILE 1	2,2	2,15 +/- 0,10
HUILE 2	2,2	1,89 +/- 0,10
HUILE 4	3,3	1,86 +/- 0,10
HUILE 3	3,3	1,54 +/- 0,10

Tableau 4. 18 : Influence de la nature du lubrifiant utilisé sur la vitesse d'usure du poinçon (essai 1)

Pour comparer l'efficacité des huiles à réduire l'abrasion du poinçon, un indice de performance du lubrifiant a été calculé. Celui-ci est égal au ratio de la vitesse d'usure obtenue avec l'huile de référence et de la vitesse d'usure obtenue avec l'huile testée. On utilise un coefficient correcteur (*figure 4.29*) afin de calculer la vitesse d'usure de l'huile référence à un grammage identique à celui de l'huile testée. Les résultats obtenus sont donnés dans le *tableau 4.19*.

Nuance de lubrifiant	Indice de Performance du lubrifiant
HUILE 1	1 +/- 0.03
HUILE 2	1,18 +/- 0.03
HUILE 4	1,04 +/- 0.03
HUILE 3	1,25 +/- 0.03

Tableau 4. 19 : Indice de performance des lubrifiants à grammage équivalent

Les essais de lubrifiant réalisés au cours de la première campagne d'essais ont été complétés par de nouveaux essais lors de la seconde campagne (essais de nouvelles nuances d'huile). Les résultats sont donnés par la *figure 4.30*.

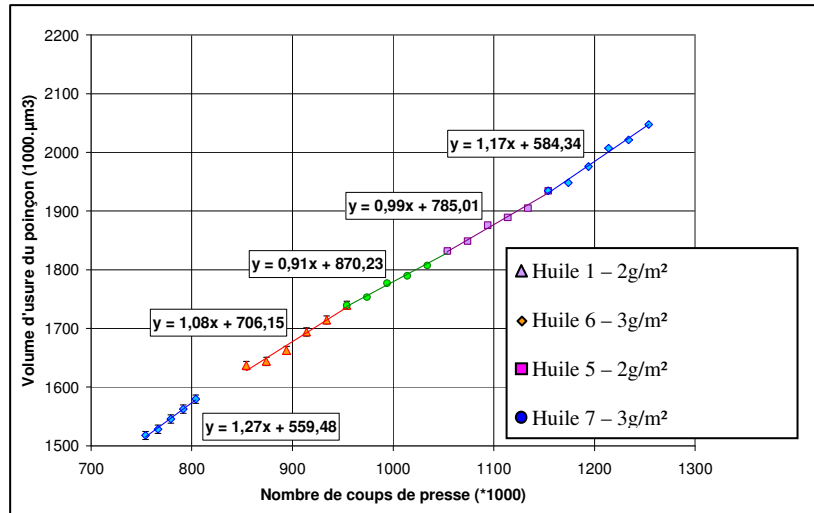


Figure 4. 30 : Influence de la nuance de lubrifiant sur l'usure du poinçon (essai 2)

Il est alors possible de calculer l'indice de performance des lubrifiants et de comparer les résultats avec les huiles testées précédemment (tableau 4.20).

Lubrifiant	Indice de Performance du lubrifiant
Huile 1	1 +/- 0.03
Huile 2	1.15+/- 0.03
Huile 4	1.03+/- 0.03
Huile 3	1.25+/- 0.03
Huile 5	1.32+/- 0.03
Huile 6	1.11+/- 0.03
Huile 7	1.21+/- 0.03

Tableau 4. 20 : Indice de performance des lubrifiants.

On observe ainsi sur le tableau 4.20 que la totalité des huiles testées ont une performance de protection contre l'usure supérieure à l'huile de référence. Le nombre de pièces découpées entre deux affûtages successifs pourrait être ainsi augmenté de 32% avec l'huile 5.

4.2.2.2.6. Influence de l'usinage des poinçons

La première campagne d'essais n'a pas permis d'obtenir toute la cinétique d'usure. Celle-ci n'a pu être identifiée qu'à partir de 800 000 coups de presse (figure 4.8). La pente moyenne ainsi obtenue est de $2.2 \mu\text{m}^3$ / coups de presse pour un poinçon carbure rectifié.

En revanche, dans le cas de la deuxième campagne d'essais avec un poinçon usiné par fil, la cinétique d'usure a pu être identifiée sur la totalité de l'essai. Trois phases apparaissent (*figure 4.31*) : une première phase, de 0 à 300 000 coups de presse, semble être une phase de rodage. La vitesse d'usure apparaît modérée avec une pente moyenne de $3.93 \mu\text{m}^3$ / coups de presse. Ensuite, une phase de faible usure intervient de 300 000 à 500 000 coups de presse. La pente moyenne est de $0.45 \mu\text{m}^3$ / coups de presse. Enfin, une phase de stabilisation apparaît après 550 000 coups de presse. La pente moyenne est de $1.22 \mu\text{m}^3$ / coups de presse.

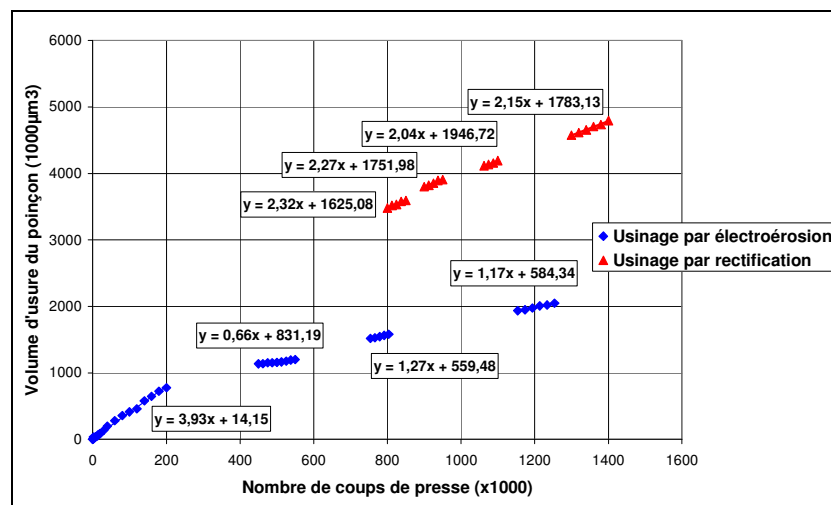


Figure 4. 31 : Influence du mode d'usinage sur l'usure du poinçon

L'analyse de l'influence du mode d'usinage est malheureusement incomplète, en effet, nous ne disposons pas de la première partie de la courbe pour le poinçon rectifié. Le perceur usiné par fil (EDM) s'use rapidement en début de vie, mais par la suite la vitesse d'usure devient plus faible.

4.2.3. Métrologie des poinçons après les essais de découpage

A la fin de chaque campagne d'essais les poinçons sont démontés et subissent une métrologie visant à contrôler leur état d'usure. Ainsi, des observations au MEB sont réalisées sur les arêtes de découpe des deux poinçons utilisés dans les essais (*figures 4.32 et 4.33*).

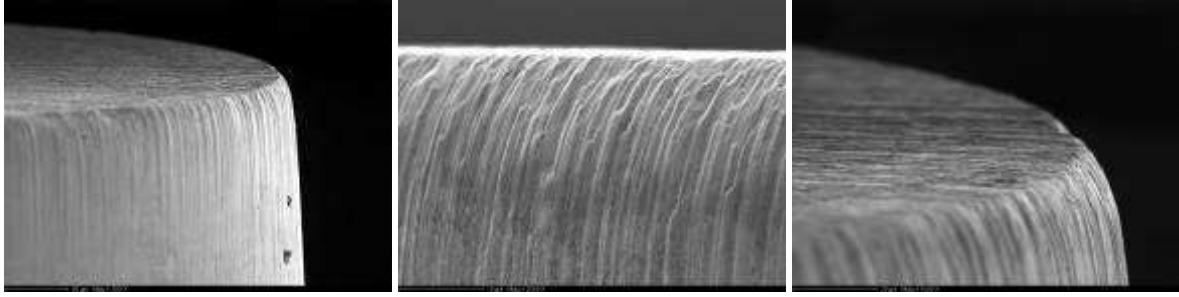


Figure 4. 32 : Images MEB poinçon 1 usé

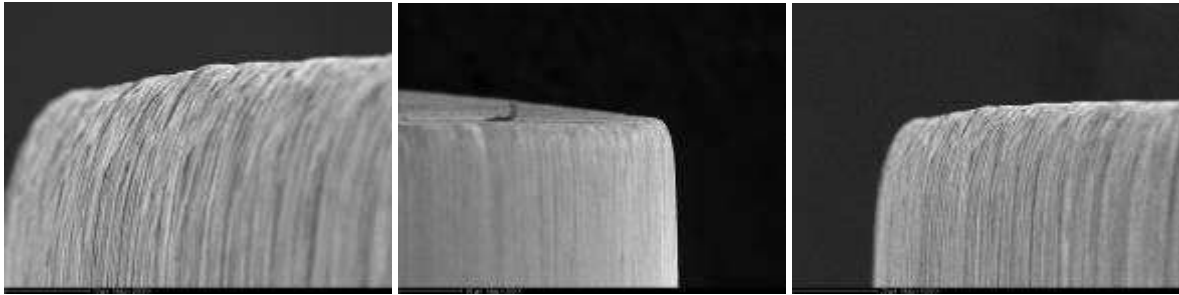


Figure 4. 33 : Images MEB poinçon 2 usé

La première constatation en observant ces figures est que les poinçons présentent un mode d'usure par abrasion. Cela génère de nettes rayures sur la surface des poinçons, parallèles à la direction de glissement. On ne constate pas d'adhésion ou de transfert de matériau cuivreux sur les poinçons.

4.2.4. Mesure de la qualité des pièces découpées

L'aspect de la zone cisailée, après la quantité de la bavure formée sur les pièces, est la caractéristique principale qui est retenue le plus souvent pour déterminer la qualité du découpage. Sa hauteur conditionne la conformité dimensionnelle des produits découpés. Nous allons exposer ici la méthode de mesure utilisée lors de nos travaux. De même, l'évolution des hauteurs des différentes zones sur les bords découpés sera présentée en fonction des différents paramètres de notre plan d'expérience.

D'autre part, la présence de bavures fait l'objet d'une analyse particulière. Une nouvelle méthode de quantification est exposée, permettant par la suite de réaliser une corrélation avec l'évolution de l'usure des poinçons au cours du temps.

4.2.4.1. Evolution des bords découpés

Les échantillons de tôles découpées prélevés périodiquement nous ont permis d'étudier l'évolution de la hauteur des zones cisailées et arrachées sur les bords découpés en fonction du nombre de coups de presse.

Des images optiques sur les bords découpés ont été réalisées avec le microscope *InfiniteFocus*® de la société *Alicona* (voir chapitre 2). Le relevé topographique de chaque pièce permet d'effectuer des mesures de la hauteur des principales zones caractéristiques de la découpe. Les résultats de la première campagne de découpe sont présentés dans leur globalité sur les figures 4.34 et 4.35.

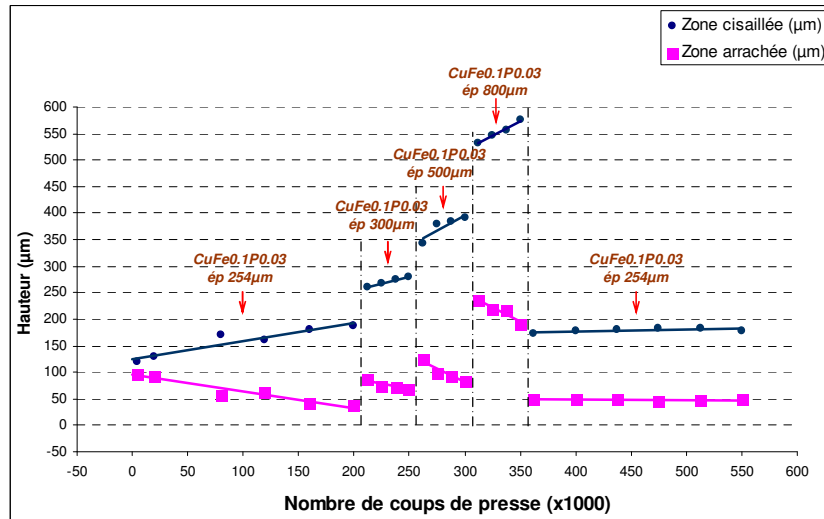


Figure 4. 34 : Influence de l'épaisseur sur l'évolution du bord découpé

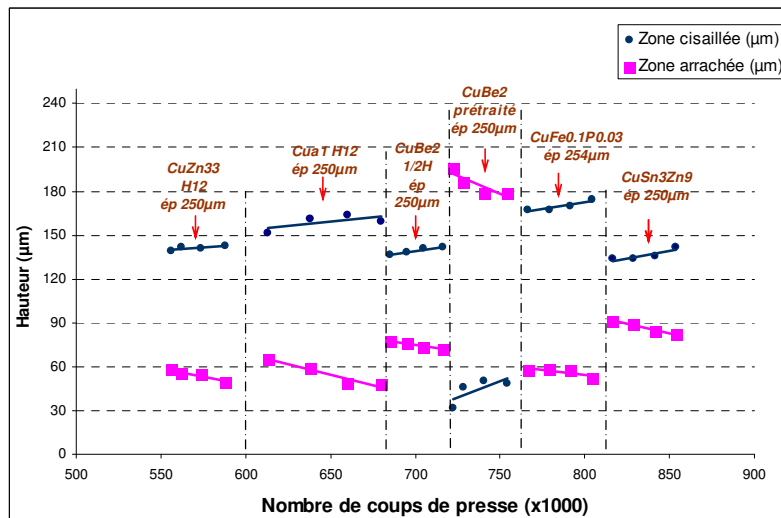


Figure 4. 35 : Influence de la nuance de tôle sur l'évolution du bord découpé

Le premier graphique de *la figure 4.34* concerne uniquement la nuance CuFe0.1P0.03 pour des épaisseurs de tôle de 254µm, 300µm, 500µm et 800µm. Dans l'ensemble des cas, la zone cisailée (plus importante) augmente alors que la zone arrachée diminue, et ce d'autant plus fortement que l'épaisseur de matière augmente. La fin de la période de rodage du poinçon a été estimée à approximativement 350 000 coups de presse. Au-delà, les hauteurs cisillées et arrachées se stabilisent respectivement à environ 180µm et 50µm, pour une tôle de 254µm d'épaisseur.

Le second graphique (*figure 4.35*) débute à 560 000 coups de presse. Les matériaux testés sont, par ordre de découpe, le CuZn33, le CuAl, le CuBe2 ½ H, le CuBe2 prétraité, le CuFe0.1P0.03 et le CuSn3Zn9. Le CuBe2 prétraité présente un comportement différent des autres matériaux. En effet, la hauteur de la zone arrachée est plus grande que celle de la zone cisailée, mais, de plus, elle décroît au cours de la découpe. Inversement, la hauteur de la zone cisailée augmente. Ainsi, la partie arrachée la plus importante est obtenue avec l'alliage le plus dur (CuBe2 prétraité, 400 Hv). Alors que la partie arrachée la moins importante est obtenue avec l'alliage CuAl (100 Hv) qui est la nuance la moins dure étudiée ici. Cependant, il n'apparaît aucune relation directe entre le profil de découpe et les caractéristiques mécaniques des nuances découpées. Quant au faciès de la zone arrachée, l'ensemble des nuances étudiées présente les caractéristiques d'une rupture ductile.

A noter que pour les alliages de cuivre étudiés, la zone bombée représente, dans tous les cas, environ 5% à 15 % de l'épaisseur de la tôle.

En résumé, un bord découpé est influencé principalement par les paramètres suivants :

- ↳ L'épaisseur de la tôle,
- ↳ Les caractéristiques des matériaux découpés,
- ↳ La géométrie de l'outillage et son état d'usure.

4.2.4.2. Suivi de l'évolution de la quantité de la bavure de découpe

Dans le découpage de précision, il est très difficile d'obtenir des contours nets et sans bavures. La possibilité d'estimer la quantité de bavure sur les pièces découpées reste d'une grande importance dans ce domaine. Car, comme indiqué auparavant, la qualité des produits est déterminée à l'aide de l'appréciation du niveau de bavure acceptable sur les pièces. Cela passe par une mesure précise de la bavure sur les bords découpés. Ce qui donne la possibilité

de comprendre la relation entre l'apparition de la bavure et l'évolution de l'usure du poinçon de découpe en fonction du nombre de coups de presse.

Lors de nos campagnes d'essais, c'est le procédé de découpage progressif qui est employé. Ce mode de découpage a pour effet l'écrasement de la bavure (*figure 4.36*) suite aux coups de presse successifs (voir chapitre 1). L'écrasement des bavures rend leurs caractérisations difficiles. En effet, le suivi de la hauteur des bavures est quasiment impossible.

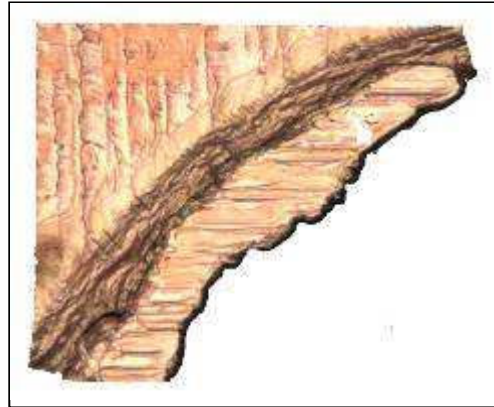


Figure 4. 36 : Bavure écrasée

L'alternative aux mesures de la hauteur des bavures peut être la quantification de son volume. Le défi à relever pour la mesure du volume de bavure n'est pas aisé puisque l'on doit mesurer avec une précision inférieure au micron des bavures sur le périmètre d'un trou de bande de 3,7mm de diamètre. De plus, la distribution de la bavure se caractérise par son inhomogénéité sur les bords découpés. Ce dernier point est illustré par l'exemple décrit ci-dessous (*figure 4.37*).

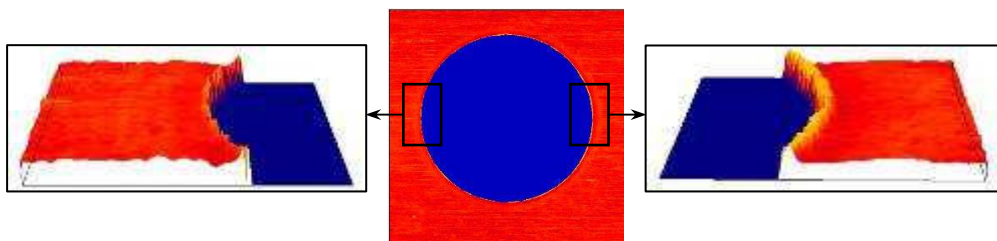


Figure 4. 37 : Exemple d'inhomogénéité de la bavure sur un bord découpé

Face à tous les problèmes cités antérieurement, nous avons mené une réflexion sur une méthode de quantification du volume de la bavure, méthode que nous allons qualifier de méthode de référence comme indiqué dans le chapitre 3.

La méthode de mesure mise au point lors de notre étude utilise le microscope *InfiniteFocus® Alicona* (décrit dans le chapitre 2). L'appareil fournit un relevé de la topographie de la bavure sur le contour de la forme découpée. La tôle à examiner est posée sur la table du microscope, la bavure étant orientée en direction de l'objectif du microscope. L'image optique réalisée en 3 dimensions enregistre le profil de la bavure le long du bord découpé, mais aussi sa physionomie. Ainsi nous pouvons mesurer avec précision la quantité d'une bavure formée sur un bord découpé.

Cette méthode a été appliquée pour la première fois sur des échantillons issus de l'essai de faisabilité cité plus haut. Ces échantillons de tôles découpées, prélevés périodiquement, ont subi le protocole de mesure de la bavure et les premiers résultats sont affichés dans leur globalité dans la figure 4.38.

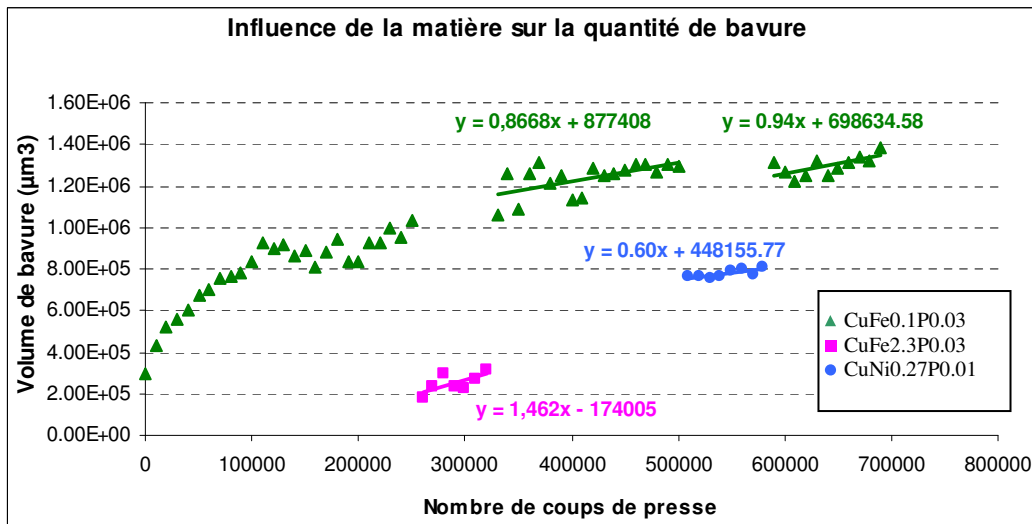


Figure 4. 38 : Evolution du volume de la bavure en fonction du nombre de coups de presse

La courbe montre deux tendances d'évolution de la bavure en fonction du nombre de coups de presse. La première partie de la courbe montre une évolution caractérisée par une cinétique élevée. Cela correspond au début de l'essai et à la durée du rodage du poinçon.

La deuxième partie de la courbe se caractérise par une évolution stabilisée. Toutefois, la courbe de la figure 4.38 montre également que la propension de chaque matériau découpé à former plus ou moins de bavure varie. Cela confirme que la composition des alliages a une forte influence sur la quantité de bavure formée. En effet, pour les nuances CuNi0.27P0.01 et CuFe2.3P0.03 la quantité de bavure formée est d'environ 35% inférieure à celle formée avec la nuance CuFe0.1P0.03 pour la première et d'environ 70% pour la deuxième nuance. On remarque que les alliages CuFe0.1P0.03 et CuFe2.3P0.03, qui ont des comportements

mécaniques proches, donnent une quantité de bavure différente. D'autre part, les alliages CuFe0.1P0.03 et CuNi0.27P0.01 ont un comportement mécanique significativement différent et forment donc des quantités de bavure différentes.

D'autre part, le volume de la bavure a été mesuré également dans la campagne d'essais réalisés à la suite de l'essai de faisabilité. Nous avons procédé à un suivi de la bavure en fonction de la nuance découpée (*figure 4.39*) puis en fonction de la lubrification (*figure 4.40*).

On constate de nouveau que la nature des tôles découpées joue un rôle important sur la quantité de la bavure formée sur les bords découpés. La différence du niveau de bavure est significative entre la nuance CuFe0.1P0.03 et le reste des nuances découpées (*figure 4.39*).

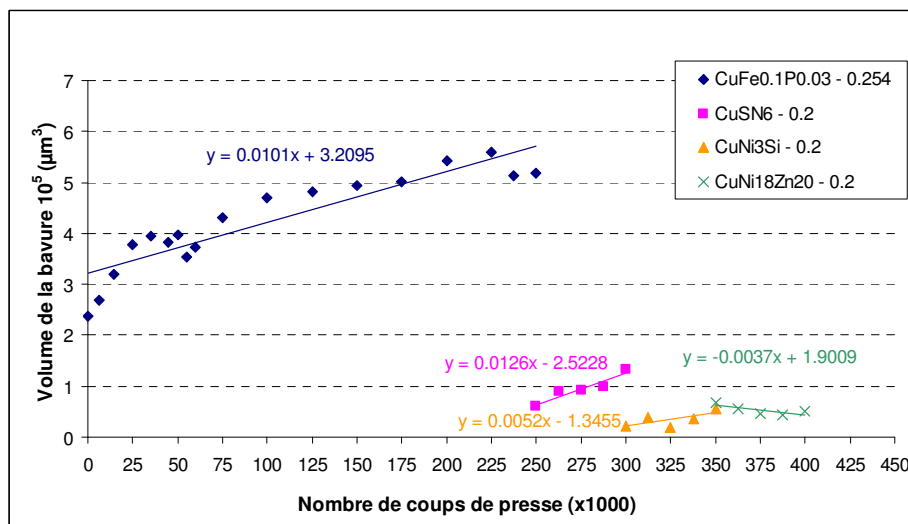


Figure 4. 39 : Influence de la nature des tôles sur l'évolution du volume de la bavure (essai 1)

Le CuSn6, une des nuances les plus abrasives d'après nos résultats de mesures de l'usure des poinçons, forme une quantité de bavure plus faible en comparaison avec la nuance de référence CuFe0.1P0.03. La relation entre l'usure et la bavure sera détaillée dans le paragraphe 4.4.

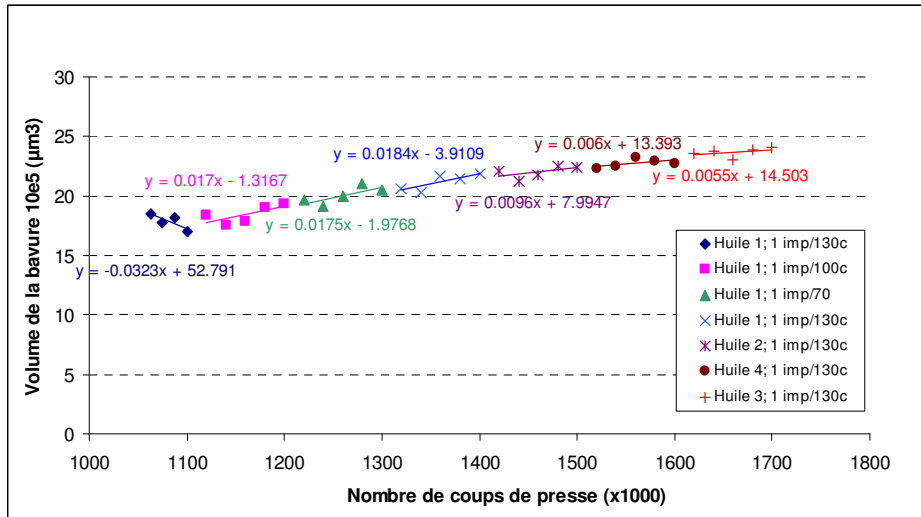


Figure 4. 40 : Influence de la lubrification sur l'évolution du volume de la bavure (essai 1)

Concernant la lubrification, les écarts enregistrés sur la bavure (figure 4.40) ne sont pas significatifs, et ne permettent pas d'identifier une quelconque influence du lubrifiant (nature et quantité) sur la quantité de bavure.

4.3. Corrélation entre la cinétique d'usure des poinçons et les taux d'usure des billes

Le but de ce paragraphe est de présenter la corrélation entre la cinétique d'usure des poinçons mesurée avec la méthode de « double réplique » et les taux d'usure identifiés grâce aux essais de frottement réalisés parallèlement aux essais de découpage. Ces valeurs représentent l'abrasivité des tôles vis-à-vis du poinçon. Pendant ces essais de frottement nous parlerons de couples de matière constitués de billes en carbure de tungstène et des différentes tôles découpées.

4.3.1. Identification de l'abrasivité des tôles - essais tribologiques

La mesure des propriétés d'abrasivité des tôles a été réalisée au moyen du dispositif de mesure locale monté sur une presse décrit au chapitre 2, permettant de recueillir des informations sur l'abrasivité des tôles en fonction des nuances des poinçons. L'objectif ici est d'une part de corréler ces mesures aux relevés de la cinétique d'usure des poinçons, et d'autre part de valider le concept pour la réalisation d'un outil de laboratoire de contrôle et de vérification des paramètres qui entrent en jeu lors de la découpe.

Comme indiqué dans le chapitre 2, les campagnes d'essais sur presse ont été accompagnées de tests d'abrasion réalisés sur le tribomètre monté sur la ligne de découpage. La mise en place de ce dispositif a permis de calculer les taux d'usure des billes en carbure de tungstène en fonction des tôles testées.

La figure 4.41 rappelle les taux d'usure enregistrés lors de nos essais de frottement.

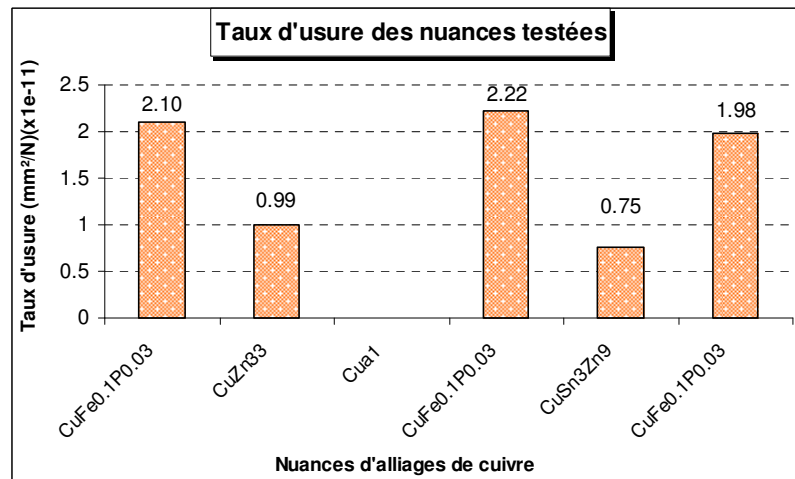


Figure 4. 41 : Taux d'usure des billes en fonction des nuances de tôles

Ces valeurs seront comparées à la cinétique d'usure du poinçon de découpe dans le paragraphe 3.3.

4.3.2. Cinétique d'usure du poinçon

Lors des essais de découpage, nous avons effectué des mesures de l'usure des poinçons de découpe en fonction du nombre de coups de presse. Ainsi, la cinétique d'usure du poinçon a été établie pour chacune des nuances étudiées.

La figure 4.42 rassemble les valeurs de la vitesse d'usure obtenues sur les différentes tôles découpées lors des essais de découpage de la deuxième campagne. Les nuances de tôles apparaissent dans l'ordre de la découpe.

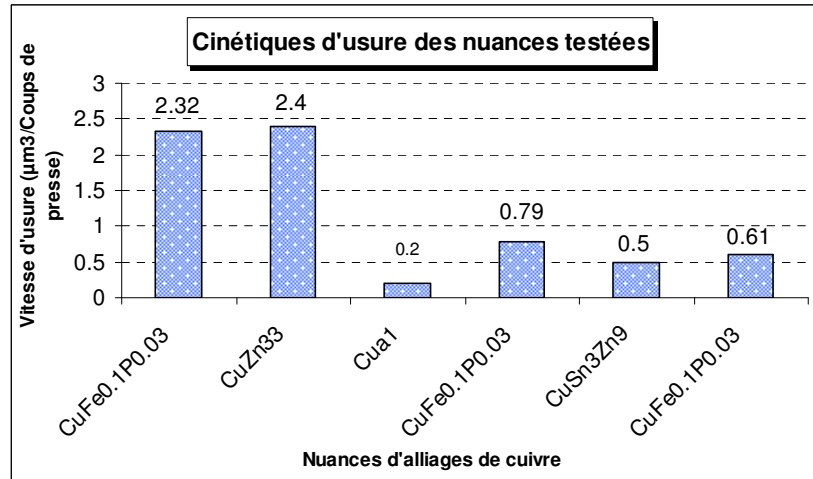


Figure 4. 42 : Vitesse d'usure du poinçon usiné par fil en fonction des tôles découpées

Outre le résultat comparatif entre les vitesses d'usure en fonction des tôles, ces données montrent clairement que l'évolution de l'usure des poinçons suit une loi habituelle, à savoir une première phase de rodage avec une cinétique élevée, suivie d'une deuxième phase avec une usure stable (Examen des valeurs de la vitesse d'usure de la nuance de référence CuFe0.1P0.03).

4.3.3. Confrontation entre les deux mesures

Afin de corréliser les valeurs du taux d'usure des billes et la cinétique d'usure des poinçons, nous allons considérer seulement la deuxième partie de la courbe donnant l'usure du poinçon en fonction du nombre de coups de presse, celle qui représente l'usure du poinçon dans un régime stabilisé. Ainsi on exclut la zone de rodage du poinçon où l'usure est élevée.

Le tableau 4.21 regroupe l'ensemble des valeurs des taux d'usure et la cinétique d'usure des poinçons. Les valeurs représentées dans ce tableau pour l'alliage CuFe0.1P0.03 sont issues de la moyenne sur plusieurs valeurs mesurées lors des essais.

Tôles (Alliage de cuivre)	Cinétique d'usure ($\mu\text{m}^3/\text{coups de presse}$)	Taux d'usure (mm^2/N) ($\times 10^{-11}$)
CuFe0.1P0.03	0.7	2.10
CuZn33	2.4	0.99
CuAl	0.2	2.26E-08
CuSn3Zn9	0.5	0.75

Tableau 4. 21 : Confrontation cinétique d'usure du poinçon / taux d'usure

On remarque dans ce tableau qu'il y a une contradiction entre les valeurs concernant la nuance CuZn33. En effet, les mesures d'usure ont montré que cette nuance était très abrasive envers le poinçon. Cependant le taux d'usure calculé pour le couple de frottement constitué de cette nuance et d'une bille en carbure de tungstène n'était pas le plus élevé de la série de mesure. Cela contredit le fait que l'abrasivité de cette nuance est importante vu le niveau de précipités détecté dans sa microstructure par l'analyse MET. Pour la suite de l'analyse, nous allons faire abstraction de la comparaison des valeurs concernant cette nuance.

La figure 4.43 représente l'évolution du taux d'usure en fonction de la vitesse d'usure du poinçon.

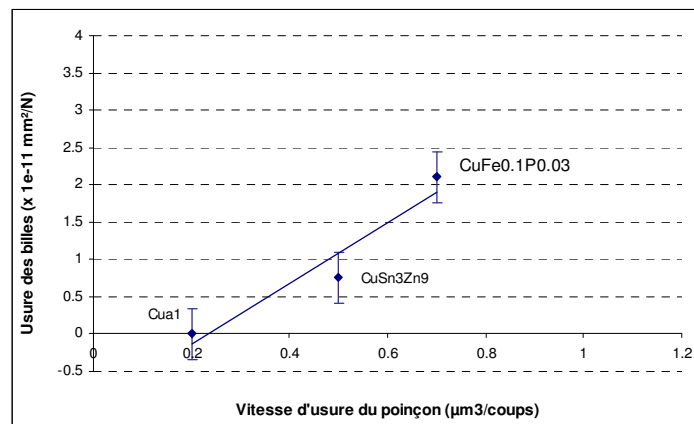


Figure 4. 43 : Vitesse d'usure du poinçon en fonction des tôles découpées

La courbe montre que l'amplitude de l'endommagement des billes, traduite par le taux d'usure, est corrélée à l'usure du poinçon, traduite par sa cinétique de perte de matière. On voit donc qu'un dispositif simple disposé sur une presse de découpe permet de classer les nuances de tôles à découper en fonction de leur abrasivité vis-à-vis du matériau de poinçon. Dès lors qu'un tel dispositif sera « transposé » en une version de table dans un laboratoire, on peut imaginer aisément l'intérêt à évaluer avant toute mise en œuvre, les matériaux alternatifs de poinçon, les nuances de tôles à découper ou encore la lubrification de découpe. Il suffit pour cela de construire un tel tribomètre sur la base des conditions opératoires de celui qui a été développé au cours de ce travail.

4.4. Corrélation entre l'usure et la bavure

Dans le domaine industriel du découpage mécanique, on s'appuie sur différents critères pour déterminer quand il est nécessaire de réaffûter ou de remplacer un poinçon. Les critères

normaux à cet égard sont le fini de surface et la dimension de la forme découpée, mais il est également courant de se baser sur la quantité de bavure acceptable sur les pièces découpées. Selon les travaux expérimentaux issus de la littérature, l'usure d'un poinçon est un paramètre qui conditionne fortement l'évolution du profil des pièces découpées et notamment la quantité de bavure présente sur ces mêmes pièces.

En effet, lors du processus de découpe de pièces en grande série, on constate de manière générale que la bavure est fortement influencée par l'usure des outils. Ce phénomène est bien évidemment lié au changement de la géométrie des arêtes de découpe et en conséquence de la distribution des contraintes dans la matière découpée.

A l'aide des résultats obtenus nous allons donc tenter d'établir une corrélation entre l'usure des poinçons et la quantité de bavure. Cela est rendu possible grâce au suivi simultané de l'évolution de l'usure sur le poinçon et la quantité de bavure sur les pièces découpées.

Nous pouvons ainsi corréler l'évolution de l'usure et la quantité de bavure formée. Les données traitées concernent les essais de faisabilité cités plus haut. Leur évolution est illustrée sur la figure 4.44.

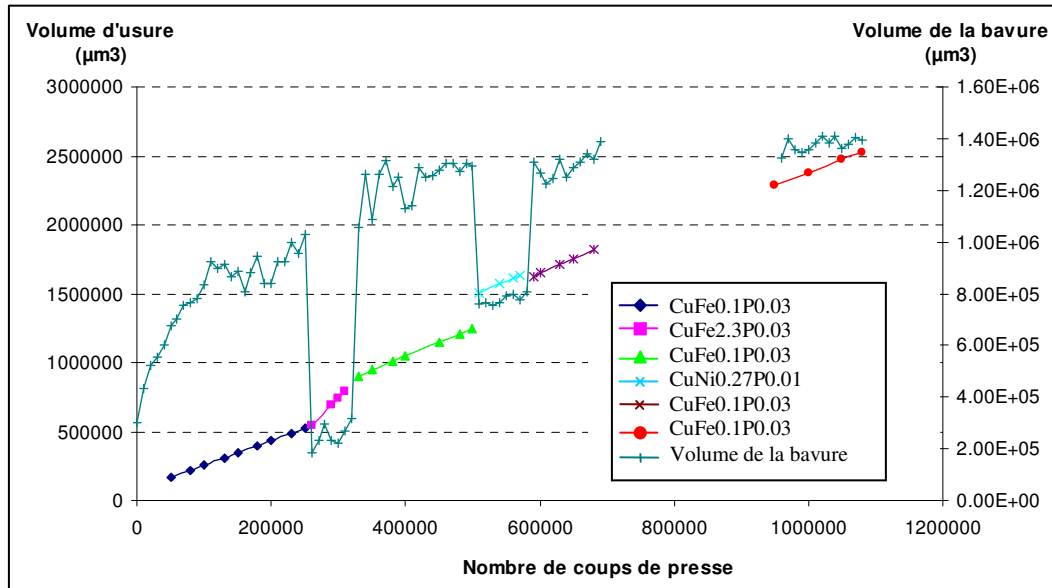


Figure 4. 44 : Evolution de l'usure et de la quantité de la bavure

Une première analyse rapide de la figure 4.44 permet de mettre en évidence plusieurs phénomènes. Tout d'abord, il convient de noter que la cinétique de l'apparition de bavures, comme cela a déjà été mis en évidence par Gréban [Gréban 2007], dépend directement de la matière découpée.

En outre, il apparaît que la cinétique de l'usure du poinçon reste pratiquement constante pour des conditions stables de découpage, en fonction du nombre de pièces découpées, tandis que la cinétique de croissance du volume de la bavure diminue (*tableau 4.22*).

Intervalle de coups de presse	Vitesse d'usure ($\mu\text{m}^3/\text{coup}$)	Vitesse d'augmentation de la bavure ($\mu\text{m}^3/\text{coup}$)
160.000 → 250.000	1,7721	1,9203
410.000 → 500.000	2,0065	1,0588
590.000 → 680.000	2,1246	0,9353
990.000 → 1080.000	1,8355	0,0558

*Tableau 4. 22 : Cinétique d'apparition de l'usure et de la bavure
(Pour le même matériau choisi parmi les matériaux à la figure 4.44)*

L'usure du poinçon est abordée de manière globale ; il reste tout à fait possible que la différence de la cinétique provienne de la distribution géométrique de ce volume portant sur le contour du poinçon.

4.5. Conclusion et synthèse des résultats

Les méthodes de caractérisation développées pendant notre travail et exposées dans le chapitre 3, nous ont permis de suivre l'évolution de la cinétique d'usure des poinçons en continu et sans démontage de celui-ci. De même, la croissance de la bavure formée sur les pièces a été quantifiée, ainsi que la géométrie des bords découpés. Ces mesures ont été réalisées en fonction du nombre de pièces découpées et suivant les différents paramètres testés pendant les essais expérimentaux. Leur réalisation dans un environnement industriel nous a donné l'opportunité de travailler dans des conditions optimales pour le développement de nos méthodes de caractérisations et de mesures.

Ainsi, pendant nos mesures, nous avons pu observer notamment que la nuance de matière découpée a une forte influence sur l'usure des poinçons. La quantité de pièces découpées entre affûtages peut ainsi varier du simple au double. Compte tenu de la structure des alliages étudiés, on peut en conclure que les précipités, qui sont des composés intermétalliques très durs, peuvent avoir un impact important sur l'usure des poinçons. En effet, le CuZn33, la nuance qui possède le plus de précipités, donne l'abrasivité la plus importante lors des essais (indice d'abrasivité 3.53) comparée à la nuance de référence

(CuFe0.1P0.03 : indice d'abrasivité 1). On note par ailleurs que les caractéristiques mécaniques, et particulièrement la dureté (Hv), ne semblent pas être en relation directe avec la cinétique d'usure du poinçon, comme on pouvait le supposer. De plus, il semble que la réduction de la taille de grains augmente l'abrasivité de certaines des nuances des alliages de cuivre étudiées.

Ces constatations montrent que le durcissement par précipitation qui est largement utilisé dans les alliages de cuivre, contribue à accélérer considérablement l'usure des poinçons lors des opérations de découpe, d'où l'importance de trouver un compromis entre l'abrasivité des tôles et leurs caractéristiques mécaniques et électriques comme cela a été démontré par Gréban [Gréban 2006].

D'autre part, les essais de découpage mettant en évidence l'influence de la lubrification sur l'usure des poinçons, montrent qu'à usure équivalente, 14% de pièces supplémentaires seront découpées par gramme d'huile supplémentaire par mètre carré déposé sur la bande, pour des grammages compris entre 2 et 5 g/m². Ce résultat démontre la nécessité d'optimiser la quantité d'huile déposée sur la tôle afin de maîtriser l'usure des outils et les fréquences d'affûtage. La protection contre l'abrasion de 4 nuances d'huile a également été comparée. Des écarts significatifs sont observés, permettant d'augmenter le nombre de pièces découpées entre affûtage de 32% avec l'huile 5 par exemple. Ce résultat montre qu'un gain de productivité important est possible par le remplacement du lubrifiant. Il reste cependant à vérifier le comportement du lubrifiant dans un outil de découpe plus complexe, et notamment l'effet sur les copeaux et éventuellement les effets sur le dégraissage des produits découpés.

L'analyse de l'influence de l'usinage des poinçons de découpe sur l'usure a été programmée sur le début des deux campagnes de découpage, avec des configurations similaires. Cependant, en raison des données incomplètes sur l'usure du poinçon rectifié cette analyse n'a pas pu être réalisée.

Il faut cependant noter que les configurations et les contraintes des essais n'ont pas permis d'effectuer des mesures avec les deux méthodes de mesure de l'usure simultanément. Il serait intéressant d'analyser la corrélation entre les mesures de ces deux méthodes : l'activation superficielle et la double réplique.

La qualité des pièces découpées a été étudiée dans un premier temps à travers le relevé des bords découpés. Dans l'ensemble des cas, la zone cisailée (plus importante hormis pour la nuance CuBe2 prétraité) augmente alors que la zone arrachée diminue en fonction du nombre de pièces découpées, et ce d'autant plus fortement que l'épaisseur de matière

augmente. On observe plus particulièrement que la partie arrachée la plus importante est obtenue avec l'alliage le plus dur (CuBe2 prétraité, 400 Hv), alors que la partie arrachée la moins importante est obtenue avec l'alliage CuAl (100 Hv) qui est la nuance la moins dure étudiée ici. Quant au faciès de la zone arrachée, l'ensemble des nuances étudiées présente les caractéristiques d'une rupture ductile. De plus, pour les alliages de cuivre étudiés, la zone bombée représente, dans tous les cas, environ 5% à 15 % de l'épaisseur de la tôle. En résumé la qualité d'un bord découpé est influencée principalement par les paramètres suivants : l'épaisseur de la tôle, les caractéristiques des matériaux découpés, la géométrie de l'outillage et son état d'usure.

Le niveau de la bavure est également conditionné par la nature des tôles découpées. La prédisposition d'une tôle à former plus ou moins de bavure a été quantifiée, et il a été montré que l'évolution de la quantité de la bavure est caractérisée par une cinétique élevée au début des essais de découpage. Ce phénomène peut être mis en relation avec une vitesse importante d'usure du poinçon pendant la période de rodage. Par la suite, la quantité de bavure varie fortement en fonction des alliages découpés. En effet, par exemple pour les nuances CuNi0.27P0.01 et CuFe2.3P0.03 la quantité de bavure formée est d'environ 35% inférieure à celle formée avec la nuance CuFe0.1P0.03 pour la première et d'environ 70% pour la deuxième nuance. Cela montre donc l'influence significative de la composition des tôles sur la quantité de bavure de découpe formée. On constate de plus que la quantité de bavure et la répartition entre zone cisailée et arrachée du profil de découpe semblent indépendantes.

La lubrification (nature et quantité) ne montre pas d'influence directe sur la bavure, comme c'est le cas pour la cinétique d'usure des poinçons. En outre, la comparaison de l'évolution de l'usure et de la bavure fait apparaître que la cinétique de l'usure du poinçon reste pratiquement constante pour des conditions stables de découpage, en fonction du nombre de pièces découpées, tandis que la vitesse de croissance du volume de la bavure diminue.

D'autre part, nous avons testé pendant nos essais une démarche de simulation expérimentale de l'abrasivité des tôles découpées, basée sur la mise en place d'un système de tribométrie. Les résultats issus de ces essais ont été confrontés aux résultats de l'usure des poinçons lors de la découpe. Il apparaît que dans l'ensemble l'amplitude de l'endommagement des billes, traduite par le taux d'usure, est corrélée à l'usure du poinçon, traduite par sa cinétique de perte de matière. Il faut cependant noter le cas de la nuance CuZn33, qui possède l'abrasivité la plus élevée d'après les mesures d'usure du poinçon, mais cette caractéristique ne se reflète pas sur les résultats obtenus avec le tribomètre. Malgré ce constat, les résultats

obtenus permettent de classer les nuances de tôles à découper en fonction de leur abrasivité vis-à-vis du matériau de poinçon. Dès lors qu'un tel dispositif sera « transposé » en une version de table dans un laboratoire, on peut imaginer aisément l'intérêt à évaluer avant toute mise en œuvre, les matériaux alternatifs de poinçon, les nuances de tôles à découper ou encore les lubrifiants de découpe. Il suffit pour cela de construire un tel tribomètre sur la base des conditions opératoires de celui qui a été développé au cours de ce travail.

Pour conclure, les essais ont montré une bonne reproductibilité des résultats. Cela consolide le fait que les méthodes mises en place pendant ces travaux peuvent contribuer à l'amélioration des performances en découpage, conformément aux attentes des industriels.

Chapitre 5

Prédiction numérique de l'usure d'un poinçon de
découpage

Liste des figures et tableaux

Figure 5. 1: Problème axisymétrique étudié.....	183
Figure 5. 2: Décomposition de l'ensemble à mailler.....	184
Figure 5. 3 : Conditions aux limites pour le découpage 2D axisymétrique.....	185
Figure 5. 4: Courbe de traction conventionnelle du CuFe0.1P0.03.....	186
Figure 5. 5 : Courbe de traction rationnelle du CuFe0.1P0.03.....	187
Figure 5. 6 : Données insérées sous ABAQUS®/Standard pour définir la plasticité du CuFe0.1P0.03.....	188
Figure 5. 7 : Usure à l'interface Poinçon / Tôle.....	190
Figure 5. 8 : Algorithme de calcul de l'usure d'un poinçon.....	191
Figure 5. 9 : Schéma de la méthode d'attribution de l'usure.....	192
Figure 5. 10 : Représentation du poinçon usé (méthode des normales).....	193
Figure 5. 11 : Evolution du profil d'usure numérique à 10, 20 et 30% de pénétration.....	194
Figure 5. 12 : Glissement lors du procédé de laminage [Triouleyre 1980].....	194
Figure 5. 13 : Evolution de la pression de contact et du glissement pour le nœud 55 en fonction de la pénétration.....	195
Figure 5. 14 : Positions des jauges pendant la découpe [Hambli 1996].....	195
Figure 5. 15 : Inversion de l'écoulement de la matière de la tôle dans la zone de cisaillement.....	196
Figure 5. 16 : Influence de la formulation du contact sur la profondeur d'usure.....	198
Figure 5. 17 : Influence de la formulation du contact sur la profondeur d'usure.....	198
Figure 5. 18 : Influence du rayon de l'arrête du poinçon sur la pénétration.....	200
Figure 5. 19 : Influence de r_p sur la profondeur d'usure.....	201
Figure 5. 20 : Influence du jeu poinçon/matrice sur la pénétration admissible par la simulation.....	202
Figure 5. 21 : Influence du jeu poinçon/matrice sur la profondeur d'usure admissible par la simulation.....	203
Figure 5. 22 : Influence du jeu pour $r_p = 50\mu\text{m}$, sur la profondeur d'usure (même pénétration 34.7%).....	204
Figure 5. 23 : Influence du matériau sur la profondeur d'usure du poinçon (30% de pénétration).....	205
Figure 5. 24 : Profil réel usé du poinçon après 766 500 coups de presse.....	207
Figure 5. 25 : Carte des iso contraintes sur la tôle déformée à 46.5% de pénétration.....	209
Figure 5. 26 : Effort de réaction sur le poinçon au cours de la pénétration, avec 8 remaillages.....	209
Figure 5. 27 : Profil et nœuds du poinçon.....	210
Figure 5. 28 : Répartition de la profondeur d'usure à l'issue de chaque remaillage.....	210
Figure 5. 29 : Evolution de l'usure au cours de la pénétration.....	211
Figure 5. 30 : Cinétique d'usure pour quelques nœuds du poinçon.....	212
Figure 5. 31 : Extrapolation de l'usure à l'aide de courbes de tendance au nœud 67 du poinçon.....	213
Figure 5. 32 : Profil numérique calculé et profil expérimental prévu à 804 000 coups.....	213
Figure 5. 33 : Profils expérimentaux et théorique (écart de 37500 coups de presse, valeurs x50).....	214
Tableau 5. 1: Caractéristiques de la géométrie modélisée.....	183
Tableau 5. 2 : Caractéristiques mécaniques des tôles étudiées.....	188
Tableau 5. 3 : Paramètres de référence de la simulation.....	197
Tableau 5. 4 : Paramètres process testés.....	199
Tableau 5. 5 : Caractéristiques du maillage.....	200
Tableau 5. 6 : Caractéristiques mécaniques des tôles étudiées.....	204
Tableau 5. 7 : Contraintes utilisées dans la simulation sous ABAQUS®.....	205
Tableau 5. 8 : Cinétiques d'usure.....	206

5. Chapitre 5 : Prédiction numérique de l'usure d'un poinçon de découpage

5.1. Introduction

L'amélioration permanente et le développement des puissances de calcul et des techniques numériques permettent de modéliser des procédés de plus en plus complexes. La modélisation numérique par éléments finis est maintenant couramment utilisée dans le domaine de la mise en forme des matériaux. En effet, cette industrie utilise de plus en plus les codes de simulation numérique afin de minimiser les temps de conception et les coûts de mise au point des outillages. Ainsi plusieurs simulations ont été proposées dans le domaine du découpage des tôles minces. Le but de ces simulations est de modéliser le procédé et d'étudier notamment la contribution des différents paramètres du procédé sur l'usure des poinçons. En outre, une prévision précise de l'état d'usure sur les outils de découpage est essentielle pour les concepteurs et les fabricants afin de maîtriser la qualité de découpe. Une méthode numérique de prédiction permettrait de s'affranchir des contraintes opératoires lors des essais pratiqués dans la phase de développement d'un outil, et ainsi réduire les coûts de conception.

En conséquence, la mise en œuvre d'une telle modélisation du procédé de découpage et le développement d'une méthode numérique de prédiction de l'usure d'un poinçon nous ont semblé importants. Les développements numériques ont été réalisés en collaboration avec *Edouard FALCONNET* ingénieur de recherche au *Département de Mécanique appliquée* de l'institut *Femto-ST (Besançon)*. Ces travaux ont été effectués suivant les orientations expérimentales de nos essais. Nous avons choisi d'utiliser le logiciel *ABAQUS®* pour la simulation par éléments finis du procédé selon une hypothèse d'axisymétrie. Les développements effectués au cours de nos travaux portent sur l'intégration numérique d'un modèle d'usure dans un algorithme de calcul, pour obtenir ensuite un profil d'usure du poinçon. Les résultats issus de la simulation seront utilisés pour la prédiction de l'état d'usure des poinçons en mettant en œuvre la loi d'usure *d'Archard*. Différents tests numériques ont été réalisés, mettant en évidence la fiabilité et la robustesse du modèle numérique. Enfin, une validation de la modélisation est proposée par rapport aux mesures expérimentales de l'usure du poinçon.

5.2. Modélisation et simulation du procédé de découpage

Une prédiction numérique de l'usure des poinçons lors du procédé de découpage mécanique passe par une modélisation de cette opération. Cette modélisation a été effectuée à l'aide du logiciel de calcul par éléments finis *ABAQUS®/CAE*. Il est utilisé pour mettre en données le problème et pour réaliser le calcul à proprement parler. Le post-traitement des données est réalisé sous le logiciel *MATLAB®*. *ABAQUS®* propose deux méthodes d'analyse :

- ↳ *ABAQUS®/Standard*, qui permet de résoudre des problèmes linéaires et non-linéaires en statique, dynamique, thermique et électrique. La résolution des systèmes d'équations à chaque incrément se fait de façon implicite.
- ↳ *ABAQUS®/Explicit*, qui est plus adapté pour modéliser des phénomènes brefs, brutaux, ou transitoires (impact, explosion, propagation de vague, ...)

D'un point de vue général, *ABAQUS®/Standard* a moins de problèmes de convergence car sa technique de résolution est inconditionnellement stable. *ABAQUS®/Explicit* est plus rapide pour traiter des modèles qui disposent d'un maillage très fin et des formulations de contacts complexes. Le logiciel fonctionne sur un principe de modules qui permettent au fur et à mesure de construire un modèle numérique et récupérer les résultats du calcul.

5.2.1. Problème considéré et démarche de modélisation

Lors de nos travaux, les essais expérimentaux de découpage sont réalisés avec un poinçon de géométrie cylindrique. Afin de se rapprocher des conditions expérimentales, cette configuration sera utilisée pour modéliser l'opération de découpe. La géométrie des composants, le chargement et les conditions aux limites respectant une symétrie de révolution autour de l'axe du poinçon, la simulation de l'opération de découpage peut être réalisée en configuration 2D axisymétrique. Les conditions de symétrie sont appliquées sur l'ensemble des pièces (*figure 5.1*).

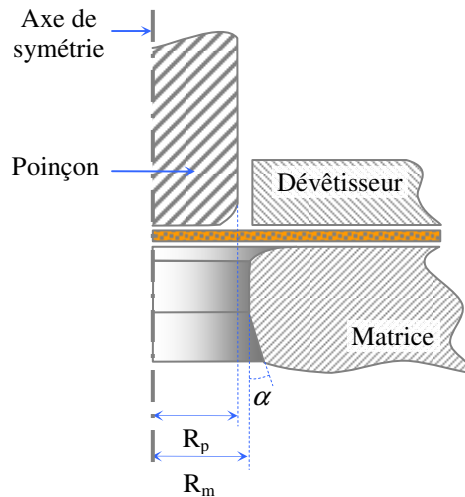


Figure 5. 1: Problème axisymétrique étudié

Le *tableau 5.1* regroupe les données géométriques de l'opération du découpage étudiée.

Tôle	Epaisseur de la tôle	0,254 mm
	Largeur de la tôle	15mm
Poinçon	Nuance de matière	Carbure de tungstène
	Géométrie	Forme cylindrique (diamètre 3,7mm)
	Angle en bout du poinçon	0°
Matrice	Rayon de l'arête coupante de la matrice	50 μm
	Jeu poinçon – matrice	20 μm
Dévêtisseur	Jeu poinçon – Dévêtisseur	20 μm

Tableau 5. 1: Caractéristiques de la géométrie modélisée

5.2.2. Définition du maillage

Une des étapes les plus importantes pour la résolution d'un problème par la méthode des éléments finis est la phase de maillage. La sensibilité des résultats numériques au maillage est très connue en calcul des structures. Pour les grandes déformations, cette sensibilité est encore plus importante. Or en découpage, le matériau subit de forts taux de déformation localisés dans une petite bande de matière. Une description numérique correcte des phénomènes mécaniques se produisant dans cette zone nécessite donc le choix d'éléments de petite taille. Ainsi, le maillage de la tôle dans la bande de cisaillement devra être très raffiné. Le poinçon est quant à lui discrétisé par des éléments rigides à une dimension au niveau de son profil. La taille des éléments devra être du même ordre de grandeur sur les deux pièces. En effet, comme nous souhaitons déterminer l'usure du poinçon par le biais du déplacement

relatif tôle / poinçon, nous avons intérêt à choisir des éléments de faible taille, et faire correspondre au mieux les nœuds du poinçon avec les nœuds de la tôle. Nous définissons donc pour les éléments de la tôle trois zones et deux tailles moyennes (*figure 5.2*).

Le maillage de la zone 2 est réalisé avec des mailles de taille très petite, car cette zone est le lieu de déformation le plus important. La taille de la maille est de l'ordre du micron (suivant le rayon de l'arête du poinçon). En revanche les zones 1 et 3 peuvent être maillées grossièrement car elles sont en dehors de la bande de cisaillement et ne subissent pas de grandes déformations. La taille des mailles dans ces zones est de l'ordre de 80 μm . Le maillage initial est composé d'éléments linéaires solides, en contraintes axisymétriques à 4 nœuds (*CAX4R*) avec intégration réduite. L'optimisation de la taille des éléments en fonction de leur position par rapport à la zone de cisaillement permet d'une part d'avoir une simulation moins coûteuse en temps de calcul, et d'autre part de bien prendre en compte le contact entre le poinçon et la tôle.

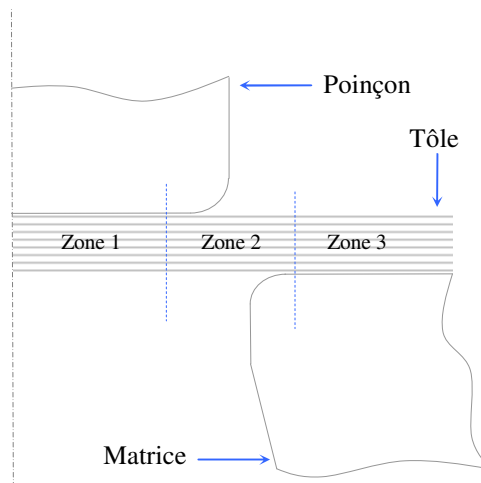


Figure 5. 2: Décomposition de l'ensemble à mailler

Concernant le poinçon et la matrice, le choix de la taille des éléments dans l'arrondi de l'arête est guidé par les dimensions des éléments de la tôle. Le dévêisseur, quant à lui, est défini par une surface analytique rigide.

5.2.3. Conditions aux limites

Dans le cas du découpage étudié (découpage axisymétrique), les conditions aux limites sont celle de la symétrie axiale (*figure 5.3*).

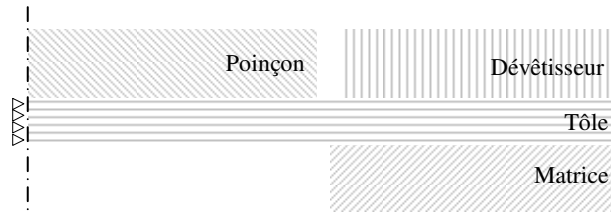


Figure 5.3 : Conditions aux limites pour le découpage 2D axisymétrique

La matrice et le dévêtisseur (serre flan) sont bloqués en translation selon les directions radiale et axiale ainsi qu'en rotation. Pour le poinçon, on n'autorise que la translation axiale. Comme il s'agit d'un modèle axisymétrique, les nœuds de l'axe de symétrie de la tôle sont bloqués dans la direction radiale. La tôle est également maintenue par une force verticale de 600N, appliquée sur le dévêtisseur durant la première étape de l'analyse.

5.2.4. Gestion du contact

La modélisation du contact avec frottement est un point clé dans le domaine de la simulation des procédés de mise en forme. Elle implique une gestion du contact particulièrement délicate d'un point de vue numérique.

La définition du contact commence dans tous les cas par la définition du type de surfaces en contact, puis par le type de frottement étudié (*small-sliding* ou *finite-sliding*). Ces deux paramètres principaux conditionneront par la suite les éléments de contact mis en jeu. Dans le cas d'une formulation sous *ABAQUS®/Standard*, l'algorithme par défaut qui définit le comportement entre deux surfaces est du type « maître-esclave » : les nœuds sur une surface « esclave » ne peuvent pénétrer les segments qui constituent la surface « maître ». Il n'y a cependant pas de restriction quant à la pénétration de la surface « maître » entre les nœuds de la surface « esclave ». Il faut donc attribuer judicieusement la surface « maître » et la surface « esclave », et définir un maillage suffisamment fin pour éviter toute pénétration de la surface « maître ». Différents modèles de frottement sont ensuite disponibles, le plus courant étant celui de *Coulomb*.

Les étapes de l'analyse sont assez nombreuses afin de garantir le bon déroulement de la simulation. En effet, les contacts doivent être correctement établis entre les différentes pièces pour éviter toute ambiguïté sur les états de contact, ce qui peut empêcher la convergence du calcul. Nous commençons donc par serrer la tôle entre le dévêtisseur et la matrice à l'aide de conditions aux limites en déplacement, remplacées par la suite par un effort (sur le

dévêtisseur). Le poinçon est ensuite mis en contact avec la tôle et une faible pression est appliquée sur le dessus de celle-ci afin de garantir un bon contact. Pour finir, le pilotage du poinçon dans la modélisation quasi-statique est effectué à vitesse constante, et un effort constant est appliqué au niveau du dévêtisseur.

5.2.5. Loi de comportement

L'identification du comportement des tôles est effectuée à l'aide d'essais expérimentaux de traction. L'ensemble de ces essais est présenté dans le chapitre 2. Le matériau utilisé lors de la modélisation est l'alliage cuivreux CuFe0.1P0.03 défini comme la nuance de référence pour nos travaux expérimentaux. Cet alliage est le matériau pour lequel nous disposons du plus grand nombre d'informations suite aux essais menés en matière d'usure. Il a donc été choisi comme matériau de référence également pour les simulations numériques. La courbe de traction du CuFe0.1P0.03 représentant la contrainte nominale en fonction de la déformation nominale (jusqu'à rupture de l'éprouvette) est présentée sur la figure 5.4.

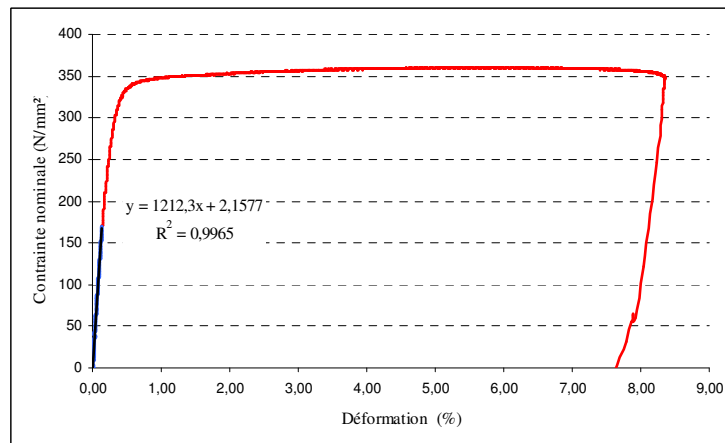


Figure 5. 4: Courbe de traction conventionnelle du CuFe0.1P0.03

Pour la simulation numérique, ABAQUS®/Standard requiert les données de la courbe de traction rationnelle pour la définition de la plasticité. On convertit donc les données expérimentales à l'aide des relations suivantes (basées sur l'hypothèse selon laquelle l'élasticité et la plasticité sont de nature incompressible) :

$$\varepsilon_{vraie} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (5.1)$$

Et :

$$\sigma_{vraie} = \frac{F}{S} = \sigma_{nom} \cdot (1 + \varepsilon_{nom}) \quad (5.2)$$

On obtient alors la courbe de traction rationnelle suivante (*figure 5.5*) :

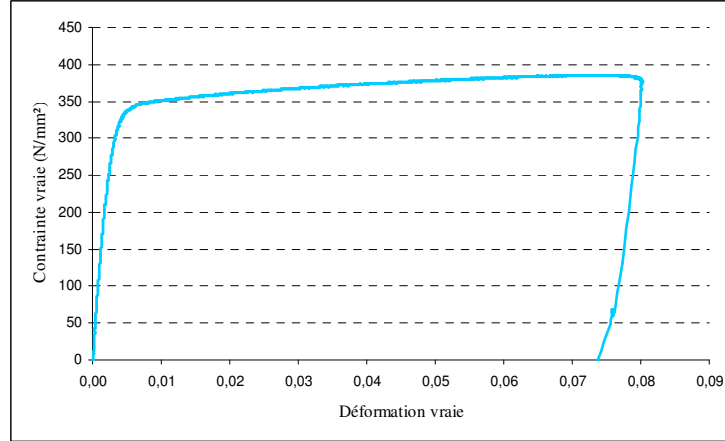


Figure 5.5 : Courbe de traction rationnelle du CuFe0.1P0.03

Pendant la simulation, nous allons atteindre de très grandes déformations. La déformation maximale de 8% obtenue lors des essais de traction sera dépassée, ce qui nécessite d'extrapoler les résultats.

La première donnée concernant le domaine plastique doit être la limite élastique. La déformation plastique correspondante doit alors être nulle. Il faut donc décomposer la déformation totale donnée par l'essai de traction en une déformation élastique et une déformation plastique.

Il est alors possible de récupérer la déformation plastique de la façon suivante :

$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon^t - \varepsilon^{el} = \varepsilon^t - \frac{\sigma}{E} \quad (5.3)$$

Au final, les données utilisées dans la simulation seront celles représentées par le graphique de la *figure 5.6*, le premier couple étant (0 ; 200 MPa) et le dernier (1 ; 400 MPa).

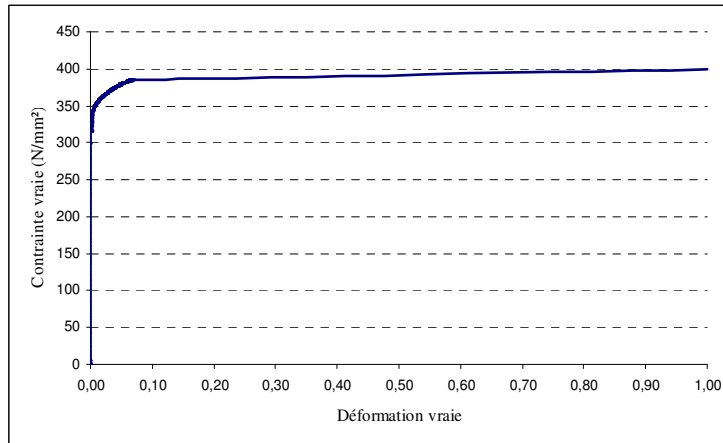


Figure 5. 6 : Données insérées sous ABAQUS®/Standard pour définir la plasticité du CuFe0.1P0.03

Afin de réaliser une validation du modèle utilisé lors de la simulation deux autres nuances d'alliages cuivreux seront employées. Il s'agit des alliages CuNi18Zn20 et CuSn6, qui possèdent les caractéristiques mécaniques mentionnées dans le *tableau 5.2*.

		CuFe0.1P0.03	CuNi18Zn20	CuSn6
Module de Young	E (GPa)	121	101.73	91.18
Limite élastique	R _e (MPa)	200	224	300
Coefficient de Poisson	ν	0.34	0.34	0.34

Tableau 5. 2 : Caractéristiques mécaniques des tôles étudiées

Les courbes de traction de ces deux nuances utilisées pour l'analyse de sensibilité, sont traitées de la même façon que la courbe de traction du CuFe0.1P0.03.

D'autre part, si les tôles considérées dans notre étude ont un comportement élasto-plastique selon la loi de « Ludwik », le reste des éléments à savoir le poinçon, le dévêisseur et la matrice, sont considérés comme des corps rigides.

5.3. Prédiction numérique de l'usure d'un poinçon

Les intérêts d'un modèle prédictif de l'usure d'un poinçon de découpe par simulation du procédé de découpage se manifestent dans la possibilité de dimensionnement des outils, et la prédiction de leur durée de vie. Le but de notre démarche est de développer un algorithme de calcul d'usure à l'aide des résultats obtenus par simulation de l'opération de découpage. Il s'agit de déterminer la répartition des profondeurs d'usure pour chaque nœud du poinçon, et donc l'évolution de son profil au cours de la découpe.

5.3.1. Formulation de la loi d'usure d'Archard

Nous nous sommes intéressés à l'établissement d'un algorithme de calcul permettant de déterminer la profondeur d'usure sur le poinçon. En se basant sur la loi d'usure d'Archard reprise par Hambli [Hambli 2004], le volume perdu par usure, V , est proportionnel à la force normale, F_N , et à la longueur de glissement, s :

$$V = K \times F_N \times s \quad (5.4)$$

Où K est le coefficient d'usure du contact entre le poinçon et la tôle.

L'équation 4 peut s'écrire pour chaque nœud i appartenant au contact sous la forme :

$$V_i = K_i \times (F_N)_i \times s_i \quad (5.5)$$

Hambli rapporte cette équation à un élément de volume élémentaire représentatif dV :

$$dV = K \times dF_N \times ds \quad (5.6)$$

dV et dF_N sont rapportés à une surface de contact élémentaire $d\Omega$ sous la forme suivante :

$$dV = dW \times d\Omega \quad (5.7)$$

$$dF_N = p \times d\Omega \quad (5.8)$$

avec dW : profondeur d'usure, selon la normale à la surface de contact,
 p : pression de contact.

Pour un incrément d_s donné, la combinaison des équations 5.6, 5.7 et 5.8 donne :

$$dW = K \times p \times d_s \quad (9)$$

Pour l'intégration numérique de la loi d'usure, on considère un intervalle de temps $[t_n, t_{n+1}]$ correspondant aux incréments n et $n+1$. La loi incrémentale (9) est alors intégrée par le schéma d'Euler suivant :

$$(W)_{n+1} = (W)_n + K \times p_{n+1} \times s_n^{n+1} \quad (10)$$

Où s_n^{n+1} qui représente la distance de glissement entre les incréments n et $n+1$, est exprimée par :

$$s_n^{n+1} = \|s_{n+1}\| - \|s_n\| \quad (11)$$

Où s_n représente le glissement cumulé à l'incrément n calculé par la variable *CSLIP*.

D'autre part, les essais tribologiques effectués sur des billes en carbure de tungstène et des tôles CuFe0.1P0.03 nous donnent un coefficient d'usure moyen (voir chapitre 2):

$$K \approx 2,102.10^{-17} \text{ m}^2 / N$$

5.3.2. Algorithme de calcul de l'usure

L'objectif de cette étape est de programmer un algorithme afin d'estimer la profondeur d'usure sur l'arête de découpe d'un poinçon (figure 5.7).

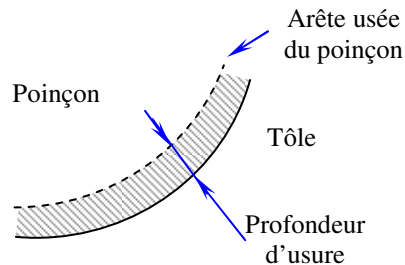


Figure 5. 7 : Usure à l'interface Poinçon / Tôle.

Nous proposons un premier organigramme regroupant les étapes principales de notre programmation (figure 5.8).

L'algorithme établi pour la prédiction numérique de l'usure est présenté dans sa globalité dans les annexes. En outre, les principales étapes de l'algorithme sont décrites plus en détail dans les paragraphes qui suivent. Et plus particulièrement, l'implantation d'une loi pour l'attribution de l'usure aux nœuds du poinçon à travers les données concernant les nœuds de la tôle.

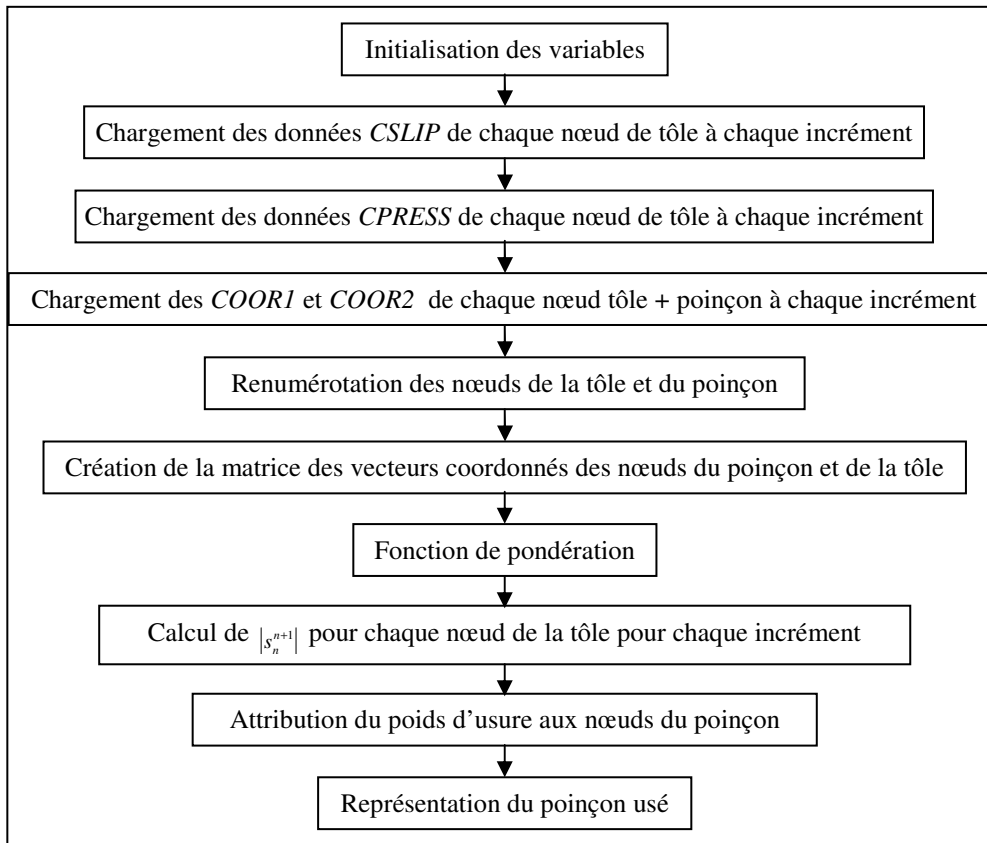


Figure 5. 8 : Algorithme de calcul de l'usure d'un poinçon

5.3.2.1. Présentation de l'implantation d'une loi Gaussienne pour l'attribution de l'usure

Dans notre modélisation, les outils (poinçon, matrice et dévêtisseur) sont des solides rigides indéformables. Les valeurs de la pression et du glissement sont calculées dans un premier temps en chaque point de la tôle déformable en contact avec les outils. D'où, la difficulté majeure lors du calcul numérique de la profondeur d'usure consiste à affecter à chaque nœud du poinçon P_j les valeurs de pression et de glissement des nœuds de la tôle se trouvant au voisinage de P_j . Dans ce paragraphe, notre but est de prendre en compte la totalité des nœuds de la surface de tôle et de différencier le poids apporté par un nœud proche ou éloigné du nœud du poinçon considéré.

Ainsi, afin d'avoir une répartition assez fidèle du poids d'usure sur les nœuds du poinçon, nous avons implanté une fonction de pondération de type Gaussienne dans notre algorithme de calcul. Cette dernière, formulée selon Pijaudier-Cabot [Pijaudier 1987] permet de considérer plusieurs nœuds de la tôle pour chaque nœud du poinçon, en tenant compte de leur distance relative.

La formulation de la profondeur d'usure du poinçon W_P est obtenue par intégration des valeurs de profondeur de la tôle W_T selon la formule suivante :

$$\begin{cases} W_p(\vec{x}) = \frac{1}{\phi(\vec{x})} \int_l W_T(\vec{y}) \cdot \phi(\vec{x} - \vec{y}) \cdot d\vec{y} \\ \phi(\vec{x}) = \int_l \phi(\vec{x} - \vec{y}) \cdot d\vec{y} \end{cases} \quad (5.12)$$

Avec

\vec{x} : Vecteur des coordonnées des nœuds du poinçon

\vec{y} : Vecteur des coordonnées des nœuds de la tôle

$\phi(\vec{x})$: Fonction de pondération

l_c : Rayon du disque $D(\vec{x}, l_c)$ qui englobe les nœuds de la tôle

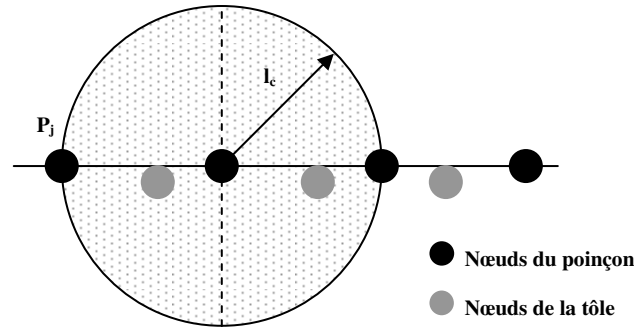


Figure 5.9 : Schéma de la méthode d'attribution de l'usure

A partir des expressions (5.11) et (5.12), la profondeur d'usure au point P_j à l'incrément $n+1$ s'obtient par la formulation suivante :

$$W_{P_j}^{n+1} = W_{P_j}^n + \frac{N_p}{\phi^{n+1}(\vec{x})} \left[\sum_{i=1}^N K \cdot p_i^{n+1} \cdot s_n^{n+1} \cdot \phi(\vec{x}_j - \vec{y}_i) \right] \quad (5.13)$$

Avec :

N : Nombre de nœuds de la tôle considérés dans le disque

N_p : Nombre de coups de presse

Concernant la fonction de pondération $\phi(\vec{x})$ on utilise une fonction de type Gaussienne définie par Pijaudier-Cabot et Bazant :

$$\phi(\vec{x}) = \exp(-|\vec{x}|^2 / l_c^2) \quad (5.14)$$

Nous établissons une relation entre le rayon du disque et la distance constante entre deux nœuds du poinçon d_p , afin de gérer le nombre de nœuds de la tôle intervenant dans le calcul.

$$l_c = \lambda \cdot d_p \quad (5.15)$$

En posant $\lambda = 1$, nous prenons en compte en moyenne 2 nœuds de la tôle. Pour $\lambda = 2$, environ 5 nœuds sont considérés et pour $\lambda = 3$, 8 nœuds. Par la suite, on prendra $l_c = D_p$.

5.3.2.2. Représentation du poinçon usé

Pour mieux se rendre compte de l'évolution de l'usure du poinçon au cours de la pénétration, on se propose de reporter les valeurs de profondeur d'usure sur le profil du poinçon.

Pour cela on utilise la méthode des normales afin de reporter la profondeur d'usure. Cette méthode consiste à déterminer la normale unitaire de deux facettes entourant le nœud auquel on souhaite attribuer la profondeur d'usure, puis de faire la somme de ces deux vecteurs afin d'obtenir la normale du nœud traité. Il ne reste alors plus qu'à rendre ce vecteur unitaire et y reporter la valeur d'usure (*figure 5.10*).

$$\vec{W} = W_j \cdot \vec{n} \quad (5.16)$$

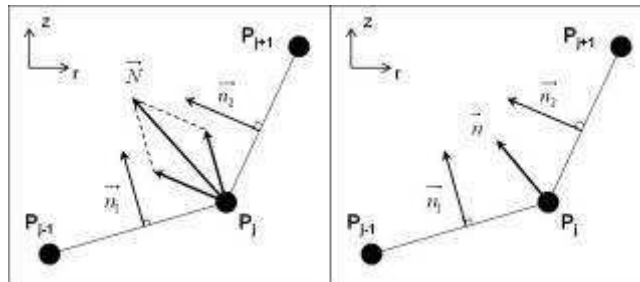


Figure 5.10 : Représentation du poinçon usé (méthode des normales)

Finalement, on en déduit la profondeur d'usure du poinçon en un point de l'interface. On obtient alors la représentation de la *figure 5.11*. (Le coefficient d'usure K a été fixé à $2.10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}$, pour avoir une représentation assez visible de la profondeur d'usure du poinçon).

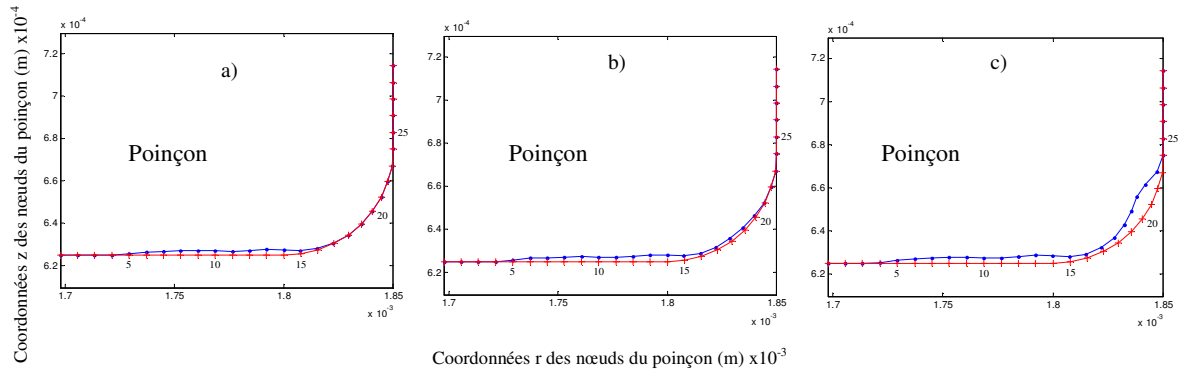


Figure 5.11 : Evolution du profil d'usure numérique à 10, 20 et 30% de pénétration

Dans un premier temps, c'est la face inférieure du poinçon qui s'use, de façon assez uniforme. Le nœud 14, qui correspond au 1^{er} nœud inférieur de l'arrondi, s'use plus rapidement (pression plus importante). Ensuite, c'est l'arrondi du poinçon qui entre progressivement en contact avec la tôle. L'usure aux nœuds 15, 16 et 17 est moins importante que pour le reste du poinçon. Cette zone correspond à ce que nous pouvions identifier comme la « zone neutre » par analogie avec le procédé de laminage. Le glissement est quasiment nul sur une courte période, ce qui ralentit l'usure à cet endroit (*figure 5.12*) [Triouleyre 1980].

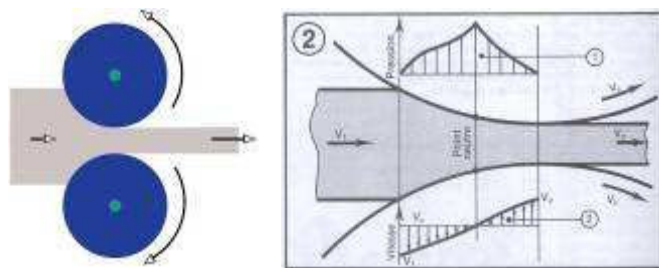


Figure 5.12 : Glissement lors du procédé de laminage [Triouleyre 1980]

En observant l'évolution du glissement et de la pression de contact du nœud 55 de la tôle (*figure 5.13*), il semble que l'on retrouve ce type de phénomène. Sur une courte période, le glissement n'évolue plus et la pression de contact est maximale.

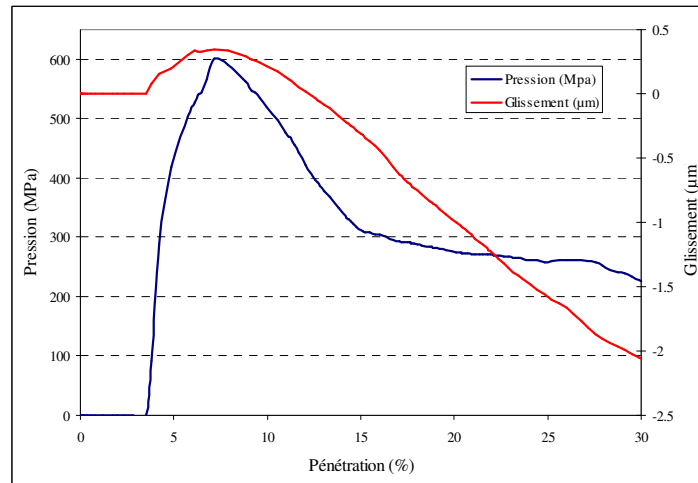


Figure 5.13 : Evolution de la pression de contact et du glissement pour le nœud 55 en fonction de la pénétration

La pénétration se poursuit, et c'est au tour des nœuds supérieurs de l'arrondi du poinçon d'entrer en contact. La matière située à droite du poinçon exerce une pression importante sur ces nœuds, ce qui engendre une usure plus importante.

Hambli [Hambli 1996] a étudié l'écoulement de la matière lors de l'opération de découpage. Pour cela, il a disposé des jauges de déformations sur des plaques circulaires, très proches de la zone de découpe. Il les a disposées sur les faces supérieure et inférieure de chaque plaque afin de déterminer l'écoulement au niveau du poinçon et de la matrice (*figure 5.14*).

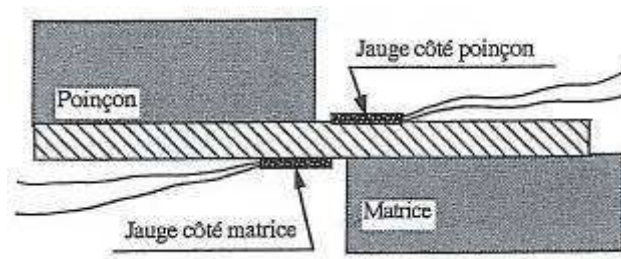


Figure 5.14 : Positions des jauges pendant la découpe [Hambli 1996]

Il avait relevé également les efforts sur le poinçon au cours du découpage à l'aide d'un capteur d'effort, ce qui a permis de mettre en évidence une première phase de montée élastique, suivie d'une phase de plastification et d'endommagement de la tôle découpée. L'ensemble de ces relevés a alors permis de schématiser l'écoulement de la matière lors du procédé.

Au tout début du découpage, il a observé une phase de refoulement de la matière due à l'indentation du poinçon. Cette phase est suivie par une phase élastique correspondant à la

formation de la zone bombée. Autour de 4 à 6% de pénétration, la zone lisse que l'on peut observer sur le profil découpé commence à se former. A 12% de pénétration, le déplacement relatif de la matière de la tôle s'inverse, ce qui correspond à la phase de cisaillement de la tôle (plastification) (*figure 5.15*). La phase de fissuration s'amorce ensuite à environ 30% de pénétration, et la rupture finale intervient au bout de 50%.

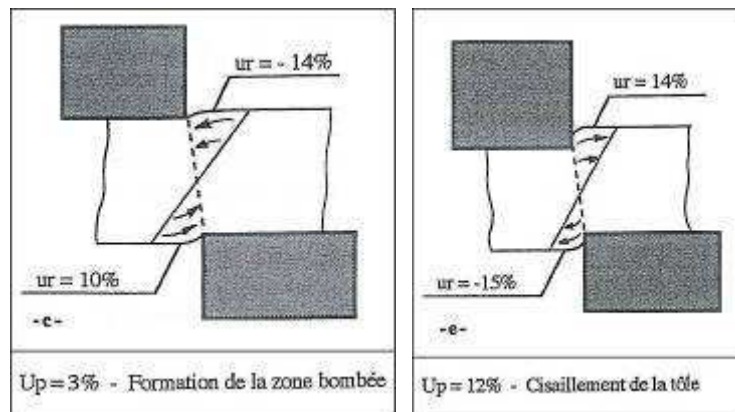


Figure 5. 15 : Inversion de l'écoulement de la matière de la tôle dans la zone de cisaillement

En comparant ces éléments avec les résultats de la simulation que nous avons menée sur *ABAQUS®/Standard*, cette étude de l'écoulement de la matière expliquerait l'inversion de tendance du glissement que nous observons pour certains nœuds de la tôle. Cela pourrait expliquer pourquoi il existe une zone de faible glissement.

La première phase de refoulement n'est cependant pas détectée sur la simulation. Cela peut être dû au fait que le matériau et l'épaisseur de la tôle étudiés ne sont pas les mêmes, et que le maillage n'est pas assez fin dans cette zone.

5.4. Validité du modèle numérique du découpage

Afin de s'assurer de la validité des données fournies par la simulation sous *ABAQUS®/Standard* ainsi que du traitement des données sous *MATLAB®*, nous avons décidé de procéder à une analyse de sensibilité.

5.4.1. Configuration de référence

Lors de cette étude de sensibilité du modèle, nous avons établi une liste de paramètres qui seront fixés au cours des différentes simulations, ils sont regroupés dans le *tableau 5.3*.

Géométrie			
diamètre poinçon = 3.7mm	épaisseur tôle = 0.254mm	jeu poinçon/matrice = 10µm/face	
Etapes et solveur			
tôle maintenue par serrage F=600N	méthode directe, full Newton	incrément de pseudo-temps minimum = 10 ⁻⁶	pénétration maxi : 50%
Frottement			
modèle de Coulomb	μ=0.1 entre matrice/tôle et dévêtisseur/tôle	μ=0 entre poinçon/tôle	
Maillage			
Tôle : éléments CAX4R (solid quad axisymmetric linear reduced integration + control hourglass)			
Poinçon + matrice : éléments RAX2 (rigid axisymmetric 1D), taille ≈ 8µm (10 elts/arête)			

Tableau 5.3 : Paramètres de référence de la simulation

5.4.2. Analyse de sensibilité numérique

On propose, dans le cadre de l'analyse de sensibilité, de déterminer l'influence de la formulation du contact. Nous avons jusqu'à présent utilisé la formulation *penalty* (par défaut) pour définir le contact avec frottement, et la formulation *frictionless* en l'absence de frottement.

Toutefois, il existe une autre formulation dans *ABAQUS®/standard* qui semble correspondre à notre cas d'étude. Il s'agit de la formulation par multiplicateurs de Lagrange. Avec cette méthode, il n'y a pas de mouvement relatif entre deux surfaces en contact jusqu'à ce que $\bar{\tau} = \bar{\tau}_{crit}$ (contrainte de frottement critique). Cependant, les multiplicateurs de Lagrange augmentent le coût de l'analyse en ajoutant plus de degrés de liberté au modèle et en augmentant le nombre d'itérations pour que la solution converge. Cette méthode doit être employée lorsque le comportement du contact joue un rôle capital (ex : *fretting*, mouvement vibratoire de faible amplitude conduisant à une usure locale).

Nous avons donc testé l'influence de cette formulation sur les résultats de la simulation. Les résultats comparatifs de cette méthode avec ceux cités plus haut sont présentés dans la *figure 5.16*. Elle présente la profondeur d'usure calculée par notre algorithme sur les nœuds du poinçon.

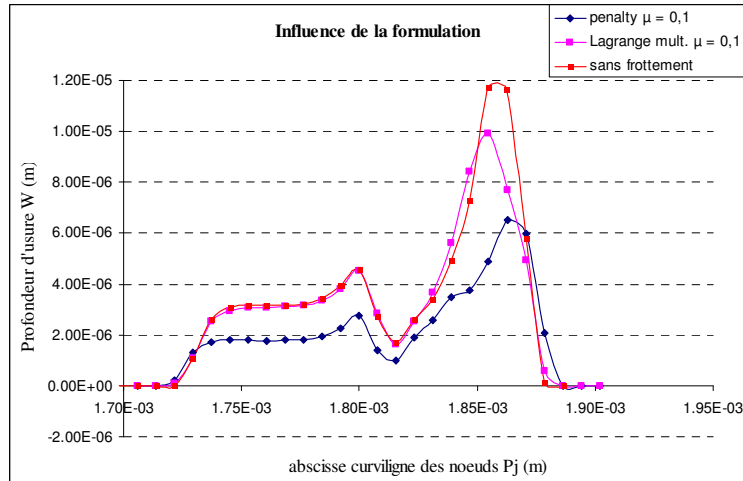


Figure 5. 16 : Influence de la formulation du contact sur la profondeur d'usure

La formulation par multiplicateurs de Lagrange correspond fortement à la formulation sans frottement, excepté au niveau du pic d'usure où la valeur est moins prononcée. La similitude entre les courbes correspondant au contact sans frottement et par multiplicateurs de Lagrange avec $\mu = 0.1$ laisse suggérer que la formulation sans frottement pourrait se faire de la même façon mais avec un coefficient de frottement nul. Afin de vérifier cela, on relance une simulation avec formulation par multiplicateurs de Lagrange et différentes valeurs de coefficient de frottement (figure 5.17).

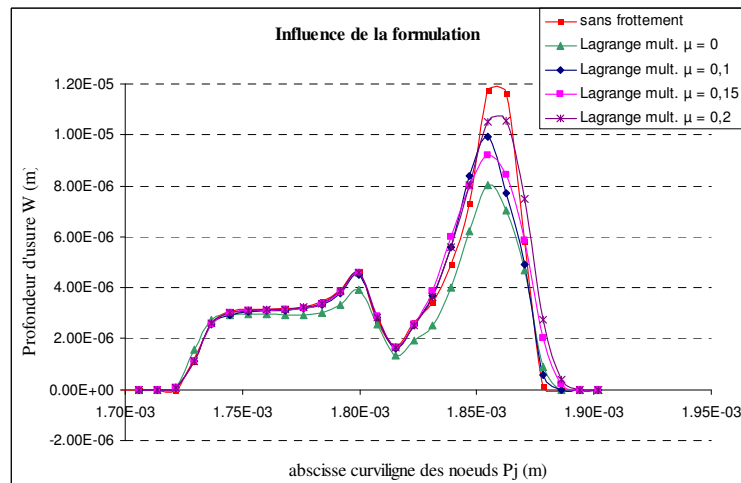


Figure 5. 17 : Influence de la formulation du contact sur la profondeur d'usure

En observant les courbes du glissement, on constate le phénomène inverse à celui rencontré dans l'analyse de l'influence du coefficient de frottement pour la formulation *penalty*. Cette fois, le glissement augmente lorsque le coefficient de frottement augmente, ce

qui semble peu réaliste d'un point de vue physique. Cette tendance se répercute sur la profondeur d'usure, avec cependant une inversion entre les courbes pour $\mu = 0.1$ et $\mu = 0.15$. En regardant les courbes de pression correspondantes, à l'abscisse $1.85 \cdot 10^{-3}$ m, les valeurs pour $\mu = 0.1$ sont supérieures pour deux nœuds, ce qui explique une profondeur d'usure localement plus importante. L'usure calculée ici n'a pas de réalité physique puisque le fait d'augmenter le coefficient de frottement réduit le glissement entre le poinçon et la tôle, en conséquence de quoi la profondeur d'usure obtenue à l'aide de la relation d'Archard est moins importante. A la vue de ces résultats, il est difficile de conclure sur la similitude entre la formulation sans frottement et celle par multiplicateurs de Lagrange. On retrouve la même tendance lorsqu'on augmente le coefficient de frottement, mais il ne semble pas y avoir de lien entre ces deux formulations. Comme expliqué précédemment, la formulation par multiplicateurs de Lagrange est plus adaptée aux cas particuliers de contact entre solides. Néanmoins, les résultats fournis pour notre cas d'étude ne semblent pas cohérents. Nous resterons donc sur la formulation *penalty*, recommandée lors des simulations de procédés de mise en forme.

5.4.3. Analyse de sensibilité aux paramètres du process

Dans un premier temps nous nous sommes intéressés à l'influence du rayon de l'arête du poinçon r_p et le jeu entre le poinçon et la matrice J_{PM} . On se propose alors de faire varier ces deux paramètres (*tableau 5.4*) et d'observer leur impact sur l'usure pour une profondeur de pénétration acceptable par le calcul sous *ABAQUS®/Standard*.

Grandeur	Valeurs
Rayon d'arête du poinçon $r_p (\mu m)$	25, 50 et 65
Jeu poinçon / matrice $J_{PM} (\mu m)$	5, 10 et 20 (par face)

Tableau 5. 4 : Paramètres process testés

Afin de garder une précision assez bonne pour le calcul d'usure, on s'arrange pour avoir dix éléments de maillage dans l'arrondi du poinçon. Il faut de même réduire suffisamment la taille des éléments de la tôle afin d'éviter les problèmes de pénétration de matière et les risques d'interruption prématurée du calcul. On définit alors trois tailles de maillage (*tableau 5.5*).

Poinçon (taille des éléments)	Maillage		
	3.927 μm	7.854 μm	10.210 μm
Tôle (nombre d'éléments dans la zone de cisaillement, largeur x épaisseur)	100 x 50	50 x 20	25 x 10

Tableau 5. 5 : Caractéristiques du maillage

Nous analysons dans un premier temps l'influence du rayon du poinçon sur la profondeur de pénétration admissible pour le calcul sous *ABAQUS®/Standard* (figure 5.20).

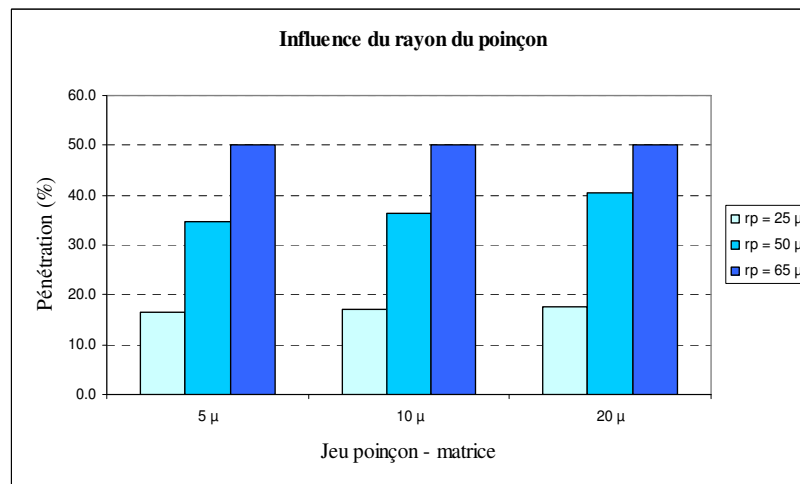


Figure 5. 18 : Influence du rayon de l'arrête du poinçon sur la pénétration

La taille du rayon r_p a un fort impact sur la simulation car elle va déterminer la déformation des éléments de la tôle et donc les limites du calcul. Un rayon trop faible conduit à une déformation locale trop importante. Les éléments en surface dégénèrent alors que ceux plus en profondeur sont encore sains.

En se servant de l'algorithme de calcul d'usure qui répartit le poids d'usure selon la formulation de Pijaudier-Cabot, nous obtenons les relevés de la figure 5.21 (a, b et c).

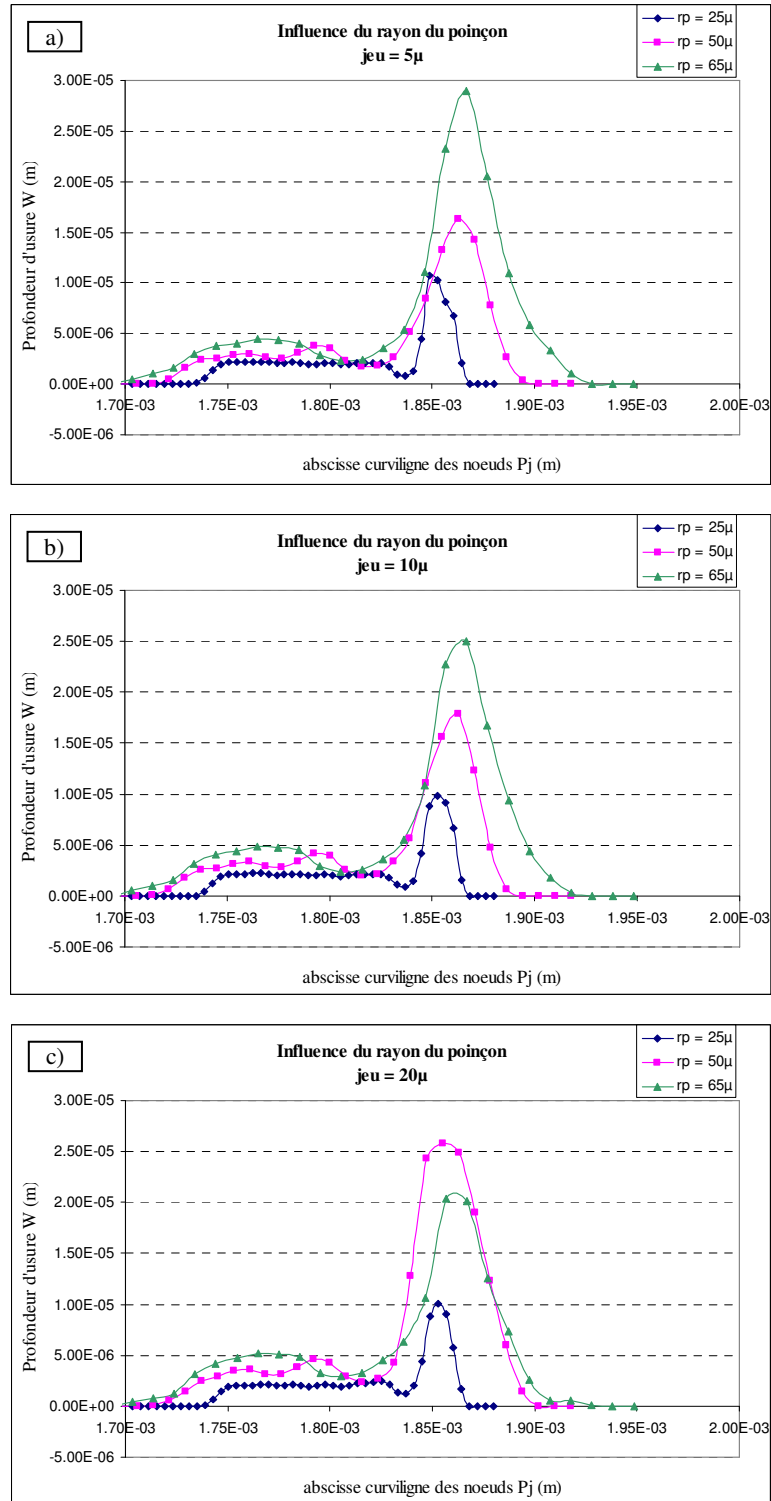


Figure 5. 19 : Influence de r_p sur la profondeur d'usure

A la vue de ces graphiques, on remarque tout d'abord que la zone de faible usure (zone « neutre ») est toujours présente dans les trois configurations. D'autre part, l'usure de la face inférieure du poinçon présente trois répartitions différentes : pour un rayon de 25μ , le profil est régulier, irrégulier pour un rayon de 50μ et concave pour un rayon de 65μ . Cette

variation est principalement due à la pression de contact qui présente des pics localement plus importants. Le fait d'augmenter le rayon de congé permet d'aller plus loin en pénétration, d'où une usure plus importante. Cependant, pour un jeu de $20\mu\text{m}$, le pic d'usure est plus grand pour un rayon de $50\mu\text{m}$ que pour $65\mu\text{m}$. Il n'est pas évident de traduire cette inversion de tendance qui semble être créée par des pressions de contact localement plus importantes, ni expliquer pourquoi elles le sont.

Nous nous intéressons maintenant à l'influence du jeu poinçon/matrice sur la profondeur de pénétration admissible (*figure 5.20*).

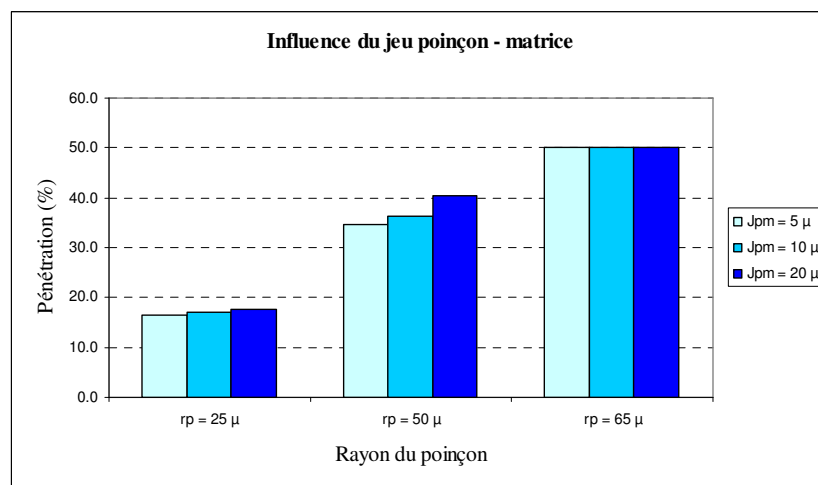


Figure 5. 20 : Influence du jeu poinçon/matrice sur la pénétration admissible par la simulation

Comparé au rayon de congé du poinçon, le jeu est un paramètre qui a un faible impact sur la profondeur de pénétration admissible. Il agit surtout sur la largeur de la bande de cisaillement. Les résultats fournis par l'algorithme du calcul d'usure sont représentés sur la *figure 5. 21*.

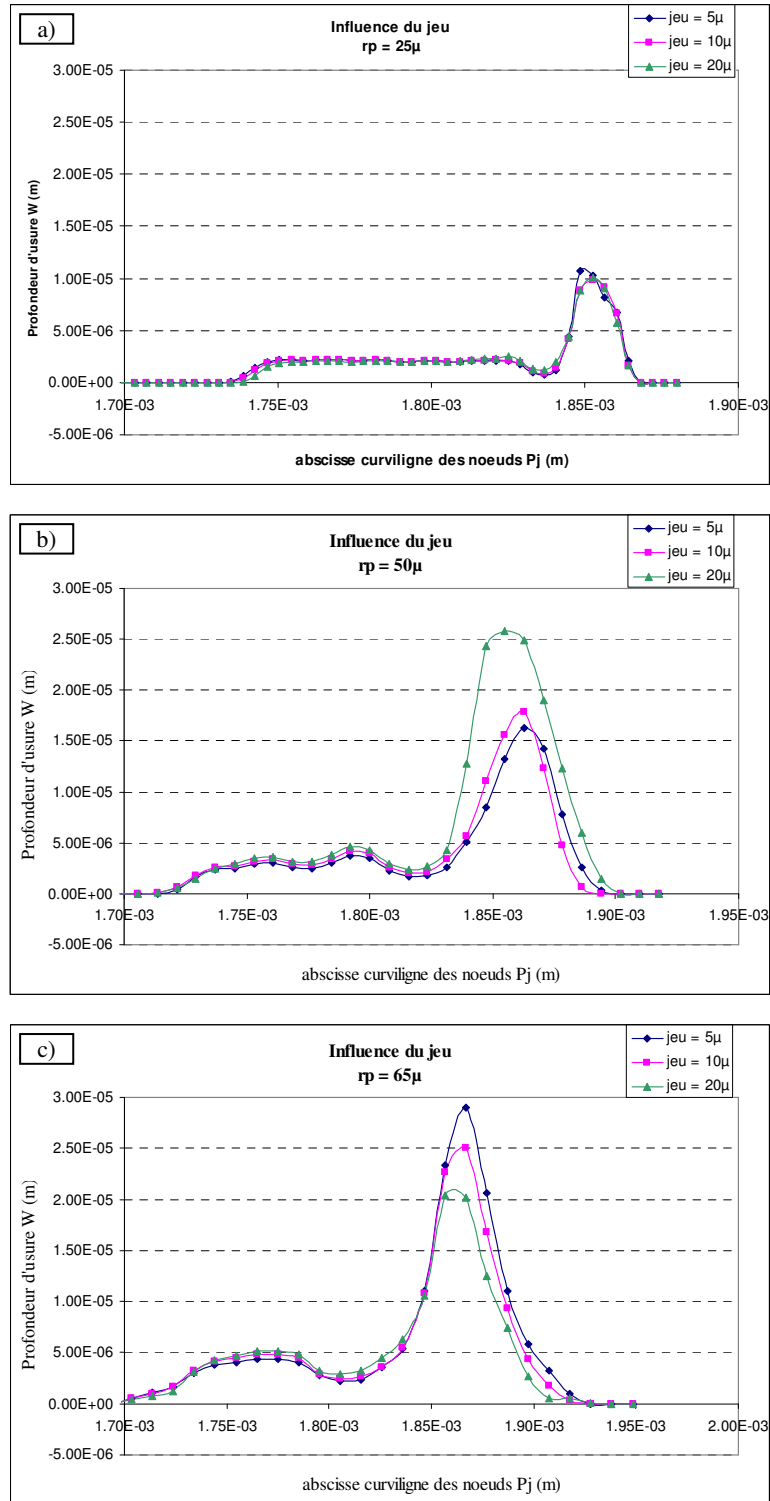


Figure 5. 21 : Influence du jeu poinçon/matrice sur la profondeur d'usure admissible par la simulation

Le jeu poinçon / matrice influence principalement le pic d'usure. Pour un rayon de $25\mu\text{m}$, l'usure est quasiment la même excepté pour un jeu de $5\mu\text{m}$ où on observe une valeur légèrement plus importante. Pour un rayon de $65\mu\text{m}$ et une profondeur de pénétration égale à 50%, l'augmentation du jeu a pour effet de réduire ce pic. Cependant, pour un rayon de $50\mu\text{m}$,

cette tendance s'inverse, avec une valeur plus marquée pour le jeu de $20\mu\text{m}$. La différence de pénétration semble être à l'origine de cette singularité car en regardant la profondeur d'usure pour une même pénétration (soit 34.7%) on retrouve bien le fait que le pic d'usure diminue lorsque le jeu augmente (*figure 5.22*).

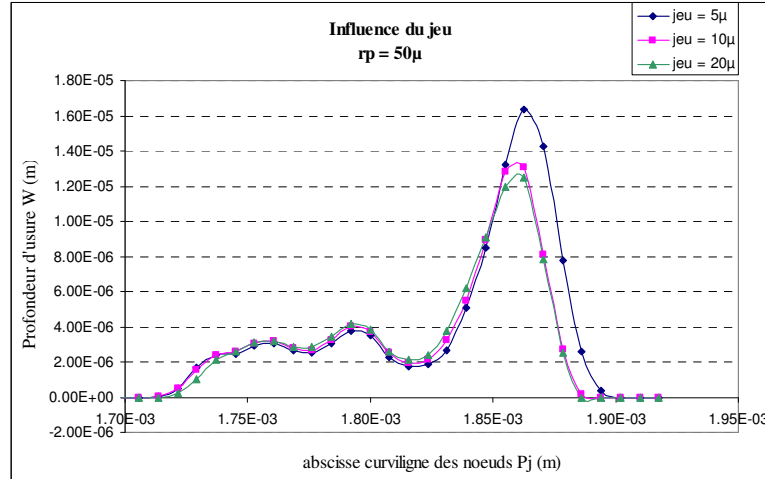


Figure 5. 22 : Influence du jeu pour $r_p = 50\mu\text{m}$, sur la profondeur d'usure (même pénétration 34.7%)

5.4.4. Influence des paramètres matériau

Par la suite nous avons étudié l'influence du matériau sur les résultats de la simulation. Nous avons testé trois matériaux dont les caractéristiques mécaniques sont différentes : CuFe0.1P0.03, CuNi18Zn20 et CuSn6 (tableau 5.6)

Matériau	E (MPa)	ν	$\sigma_{y0.2\%}$ (MPa)	K ($10^{-17}\text{m}^2/\text{N}$)
CuFe0.1P0.03	121538	0.34	332	2.102
CuNi18Zn20	101727	0.34	470	0.93
CuSn6	91182	0.34	443	2.85

Tableau 5. 6 : Caractéristiques mécaniques des tôles étudiées

Les données de traction utilisées pour la simulation sous *ABAQUS®/Standard* concernent le domaine plastique, et sont exprimées en valeurs vraies. Lorsqu'au cours de la simulation on dépasse les valeurs des points mesurés, *ABAQUS®* garde la dernière valeur de contrainte vraie constante. Ainsi, la loi de comportement se rapproche de celle d'un matériau élastique parfaitement plastique.

Pour les trois matériaux testés, nous allons dans un premier temps extrapoler les valeurs jusqu'à 100% de déformation plastique, en prenant l'asymptote de la zone plastique. Nous incluons donc un léger écrouissage. Nous comparerons ensuite les résultats en laissant ABAQUS® extrapoler les données (tableau 5.7).

Matériau	$\sigma_{\max \text{ vraie}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{extrapolée}}$ (MPa)
CuFe0.1P0.03	386	400
CuNi18Zn20	509	510
CuSn6	498	500

Tableau 5. 7 : Contraintes utilisées dans la simulation sous ABAQUS®

Les résultats de la simulation numérique sont traités par l'algorithme de calcul d'usure qui donne les courbes de la figure 5.23. On considère les coefficients d'usure expérimentaux et l'on fixe le nombre de coups de presse à 10 000 coups.

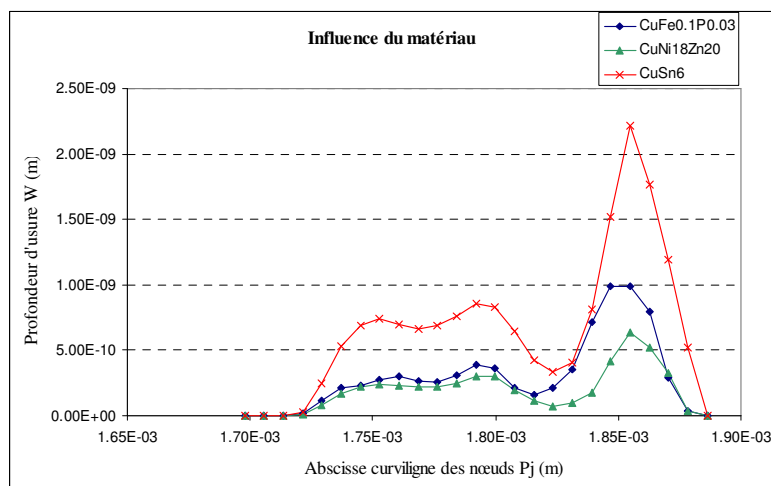


Figure 5. 23 : Influence du matériau sur la profondeur d'usure du poinçon (30% de pénétration)

A la vue de ces courbes, on note que le CuSn6 se démarque légèrement des deux autres matériaux. En effet, en observant la profondeur d'usure, on note une très forte abrasivité du CuSn6, suivie du CuFe0.1P0.03 puis du CuNi18Zn20. La zone de faible usure est localisée au même endroit pour le CuSn6 et le CuNi18Zn20, alors qu'elle est légèrement en retrait pour le CuFe0.1P0.03. La répartition le long du profil garde les mêmes caractéristiques.

Le tableau 5.8 regroupe les valeurs des cinétiques d'usure du poinçon lors de la découpe des trois tôles présentées plus haut (mesures d'usure expérimentales (chapitre 4)).

Matériau	Cinétiques d'usure
CuFe0.1P0.03	2.32 $\mu\text{m}^3/\text{cp}$
CuNi18Zn20	1.50 $\mu\text{m}^3/\text{cp}$
CuSn6	3.98 $\mu\text{m}^3/\text{cp}$

Tableau 5. 8 : Cinétiques d'usure

Nous en déduisons que le matériau le plus abrasif est le CuSn6, suivi du CuFe0.1P0.03 et enfin du CuNi18Zn20.

D'après la simulation numérique et d'un point de vue qualitatif, nous retrouvons ces résultats : le CuSn6 est le matériau le plus usant, suivi du CuFe0.1P0.03 et enfin du CuNi18Zn20. La limite d'élasticité semble être un paramètre prédominant dans le mécanisme d'usure, comme nous avons pu le constater avec le glissement et la pression.

5.5. Confrontation entre les profils d'usure expérimentale et numérique

Dans cette partie nous présenterons les premiers résultats issus de notre prédiction d'un profil d'usure d'un poinçon à partir d'un profil expérimental. Ces résultats seront discutés et analysés à la lumière des résultats expérimentaux liés à l'usure des poinçons. La confrontation sera faite en prenant en compte les résultats expérimentaux et numériques concernant les tôles CuFe0.1P0.03, matière de référence pour nos campagnes d'essais.

5.5.1. Conditions de modélisation

5.5.1.1. Paramètres de modélisation

Pour la confrontation entre les résultats numériques et expérimentaux nous avons gardé l'ensemble des paramètres utilisés lors de l'étude de sensibilité du modèle. Toutefois, le jeu poinçon/matrice a été fixé à 10 μm /face pour la simulation de la découpe de la nuance de référence CuFe0.1P0.03. Autre particularité de cette étape de confrontation est la modélisation de l'arête du poinçon avec un profil issu des relevés expérimentaux de l'usure.

En effet, nous intégrons pour cette étude un profil issu de la modélisation du profil du poinçon réel par une équation (voir chapitre 4), afin d'estimer son évolution en fonction du nombre de coups de presse. Cela constitue une différence avec les simulations présentées plus haut puisque nous avons utilisé un rayon de congé sur l'arête coupante du poinçon.

Le profil réel ainsi intégré à la géométrie dans la modélisation 2D axisymétrique représente l'état usé du poinçon après 766 500 coups de presse (*figure 5.24*). Ce profil correspond à un stade d'usure stabilisée du poinçon. Nous chercherons à prédire le profil usé correspondant à un nombre de coups de presse plus élevé (804 000).

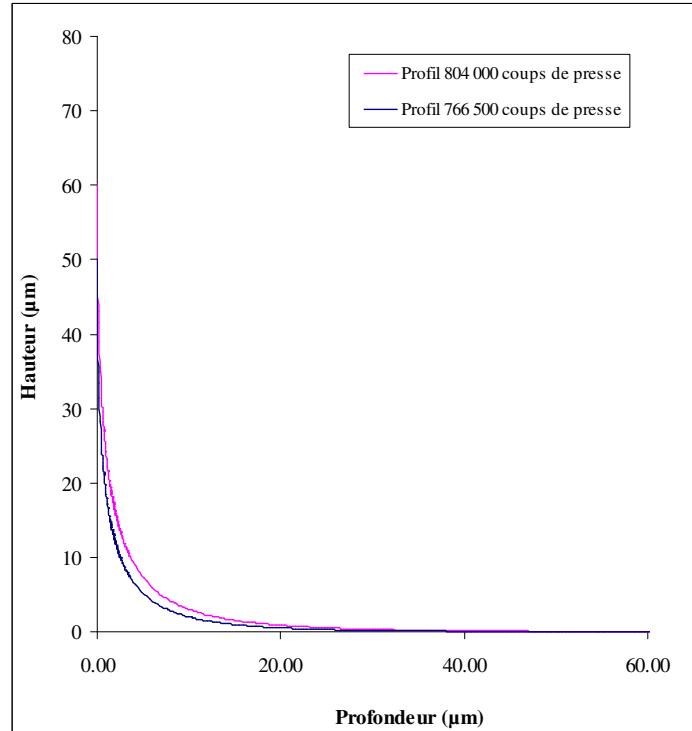


Figure 5. 24 : Profil réel usé du poinçon après 766 500 coups de presse

5.5.1.2. Remaillage de la tôle

La mesure expérimentale de la hauteur de la zone cisailée sur les bords découpés de la tôle CuFe0.1P0.03 à 766 500 coups de presse, donne une indication sur la profondeur de pénétration du poinçon à laquelle la rupture est initiée. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 4 cette profondeur correspond à environ 70% de l'épaisseur de la tôle pour cette nuance. Or, dans les conditions actuelles de simulation, il est impossible d'atteindre cette profondeur, à cause de la distorsion des éléments de la tôle. Pour pallier ce handicap, le remaillage de la tôle s'impose.

La technique de remaillage *Mesh-to-mesh* sous *ABAQUS®/Standard* consiste à créer un nouveau maillage à chaque fois que les éléments deviennent trop distordus. Chaque nouveau maillage correspond à une nouvelle simulation. La continuité de l'analyse est alors assurée par le transfert des champs de contraintes et déformations, opération qui transporte les variables calculées d'un maillage à l'autre.

Suite à une première approche effectuée sur le remaillage, les étapes retenues pour définir les simulations avec remaillage sont les suivantes :

- ↳ importation de la géométrie déformée de la tôle afin de créer une nouvelle pièce,
- ↳ modification de la répartition des éléments de la surface de la tôle afin d'être ramenée d'une part à une taille d'éléments constante pour le maillage (la géométrie importée de la tôle étant construite à partir des faces des éléments, il est nécessaire de segmenter certaines zones où les éléments se sont trop allongés) et d'autre part pour adoucir les zones anguleuses (au niveau de l'arrondi du poinçon et de la matrice, les éléments sont plus distordus. Le contour généré à partir de ces éléments est alors accidenté et va provoquer des problèmes de mise en contact pour la simulation suivante. On remplace donc localement un couple de segments par un arc de cercle, en gardant le même écart entre les nœuds),
- ↳ réaffectation des attributs du modèle numérique (outils, matériau, contact, conditions limites et chargements, maillage),
- ↳ création du fichier de commande du modèle numérique, auquel on ajoute les coordonnées du profil usé du poinçon ainsi que la commande de transport des champs de contraintes et déformations.

Cette procédure non automatique est alors répétée autant de fois qu'il est nécessaire pour poursuivre la pénétration du poinçon. La décision de remailler est prise en observant la déformation des éléments au niveau de l'arrondi du poinçon. Elle intervient lorsqu'un des éléments commence à pénétrer le poinçon. Nous avons donc effectué huit remaillages successifs pour atteindre une pénétration de 46.5%. Du fait que l'on essaie de garder une taille d'éléments constante, la profondeur de pénétration admissible pour une simulation (avant remaillage) est relativement faible (moins de 5%).

La figure 5.25 représente la carte des contraintes équivalentes de Von Mises à 46.5% de pénétration du poinçon. On constate que la tôle reste en contact avec le poinçon.

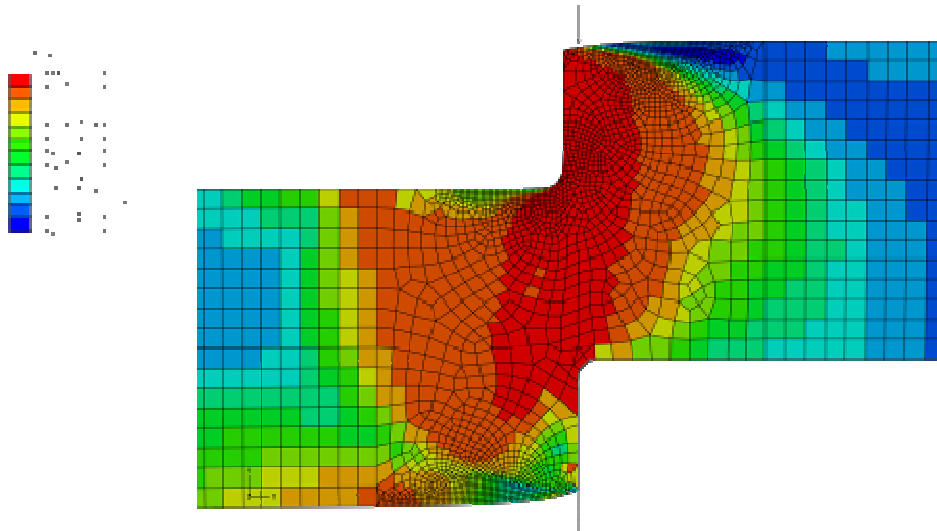


Figure 5. 25 : Carte des iso-contraintes de Von Mises sur la tôle déformée à 46.5% de pénétration.

Les données issues de ces simulations sont ensuite traitées sous le logiciel *MATLAB*® pour le calcul d'usure.

5.5.1.3. Résultats de la simulation avec remaillage

On regarde dans un premier temps l'évolution de l'effort de réaction sur le poinçon au cours de sa pénétration (*figure 5.26*).

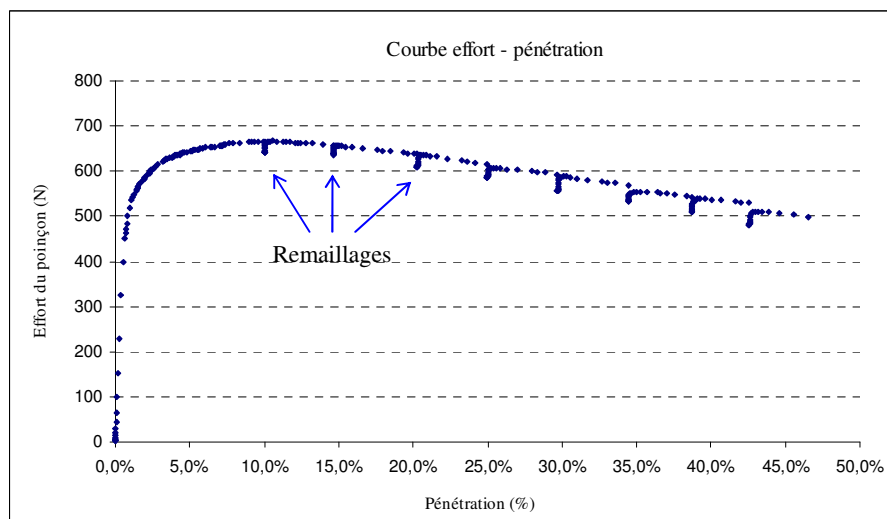


Figure 5. 26 : Effort de réaction sur le poinçon au cours de la pénétration, avec 8 remaillages

La tendance constatée sur la courbe effort du poinçon en fonction de la pénétration est continue et régulière. Le remaillage se traduit par une très légère chute de l'effort. Après

quelques incréments, on retrouve un niveau d'effort équivalent à celui observé avant le remaillage.

La profondeur d'usure est calculée pour les nœuds de l'arête du poinçon (*figure 5.27*)

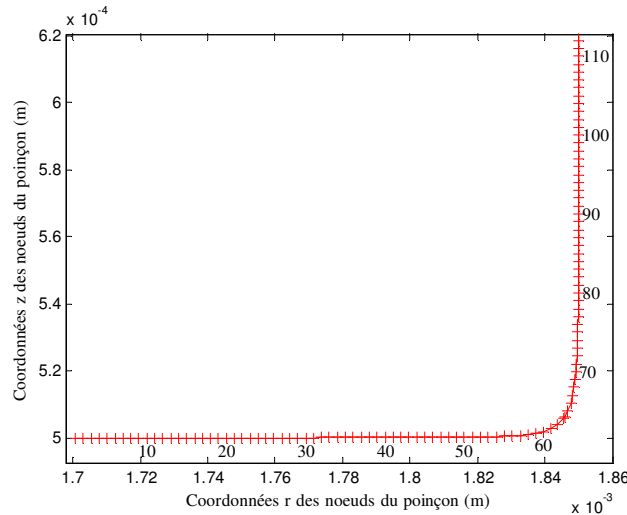


Figure 5. 27 : Profil et nœuds du poinçon

La *figure 5.28* représente l'évolution de la profondeur d'usure en fonction des positions des nœuds du poinçon pour différentes valeurs de la pénétration. On constate une évolution faible et régulière de l'usure sous le poinçon. Par contre, la profondeur d'usure s'accroît rapidement dans la zone située dans le rayon de courbure du poinçon.

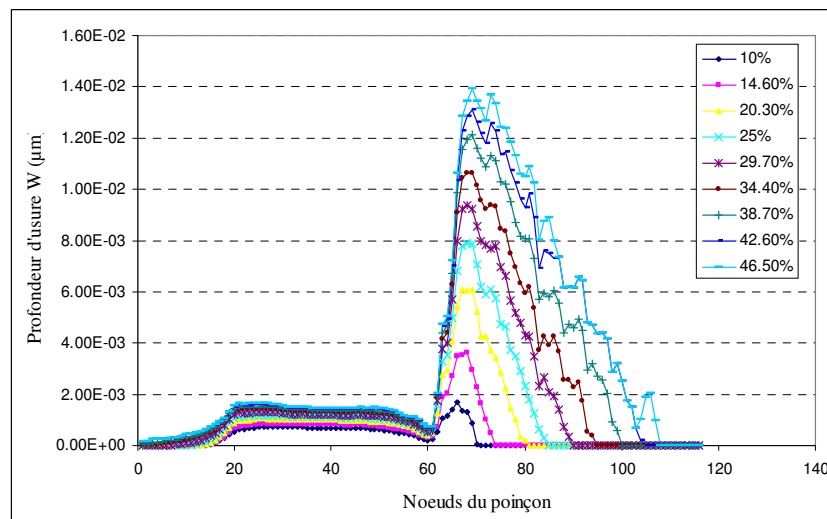


Figure 5. 28 : Répartition de la profondeur d'usure à l'issue de chaque remaillage

Sur la figure 5.29, la profondeur d'usure est représentée en fonction de la position des nœuds et de la pénétration du poinçon.

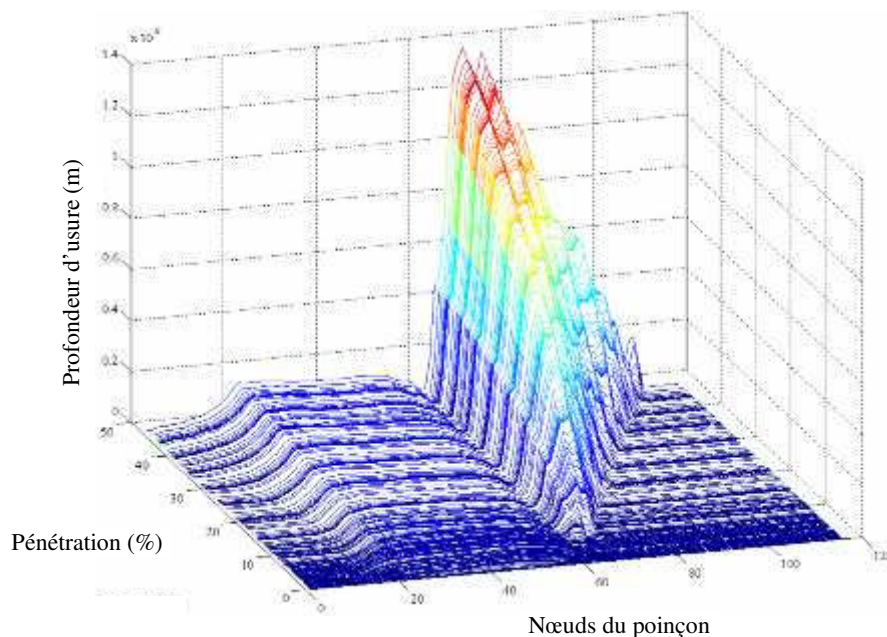


Figure 5. 29 : Evolution de l'usure au cours de la pénétration

Le fait de garder un maillage régulier avec suffisamment d'éléments permet d'attribuer correctement le poids des nœuds de la tôle, avec une meilleure précision, quelle que soit la position sur le poinçon.

La figure 5.30 représente l'évolution de la profondeur d'usure en fonction de la pénétration du poinçon en différents points du poinçon. Ceci permet d'évaluer la cinétique d'usure sur le profil du poinçon. Les cinétiques d'usure observées nous montrent également qu'un maillage plus fin et régulier permet un suivi régulier et sans perte d'information sur les nœuds du poinçon.

On constate que l'on peut décomposer ce graphique en trois régions : une usure presque constante pour les points sous le poinçon, une zone de transition à faible profondeur d'usure, et enfin, une usure rapide pour les nœuds dans le rayon de courbure et sur la surface latérale du poinçon.

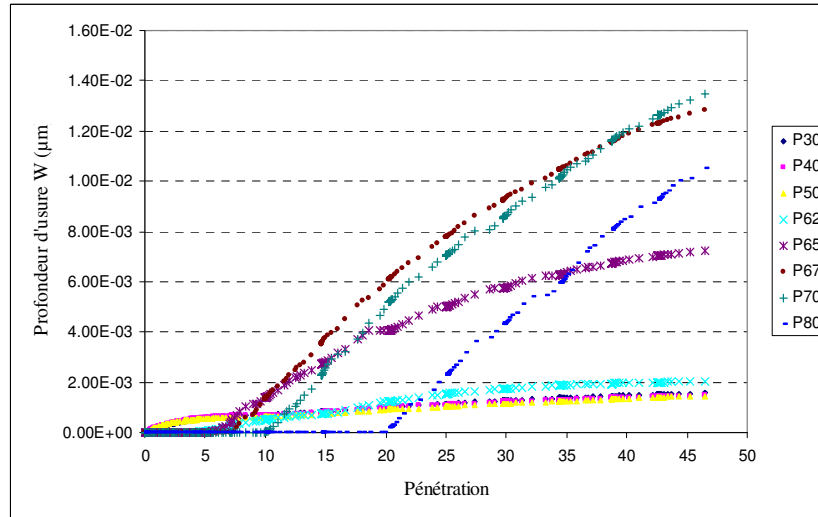


Figure 5. 30 : Cinétique d'usure pour quelques nœuds du poinçon

Le remaillage permet de garder une taille d'éléments homogène dans la zone de cisaillement. Il n'y a plus de perte d'information au niveau des nœuds de la tôle. Les tendances sont alors plus continues, ce qui permet d'extrapoler les valeurs d'usure avec davantage de confiance.

5.5.2. Confrontation entre le profil d'usure numérique et le profil d'usure expérimental

Nous allons maintenant générer un profil numérique usé à l'aide de notre algorithme de calcul. Ce profil, prédit à partir d'un profil réel, est obtenu pour un écart de 37 500 coups de presse. Nous allons vérifier en premier lieu la distribution de l'usure sur l'arête de découpe du poinçon. Par la suite, nous présenterons l'allure générale du profil usé, générée par notre algorithme.

A l'issue du dernier remaillage à 46.5% de pénétration, une tendance significative se dégage des courbes d'usure et permet d'extrapoler les données d'usure afin d'atteindre 70% de profondeur de pénétration du poinçon dans la tôle. Ainsi, en approchant les courbes de la figure 5.31 par des fonctions type $y = a \cdot \ln(x) + b$ (avec $a > 0$ et $b < 0$) nous arrivons à estimer avec une bonne approximation la profondeur d'usure à 70% de pénétration, valeur retenue par rapport à la hauteur cisailée (figure 5.31).

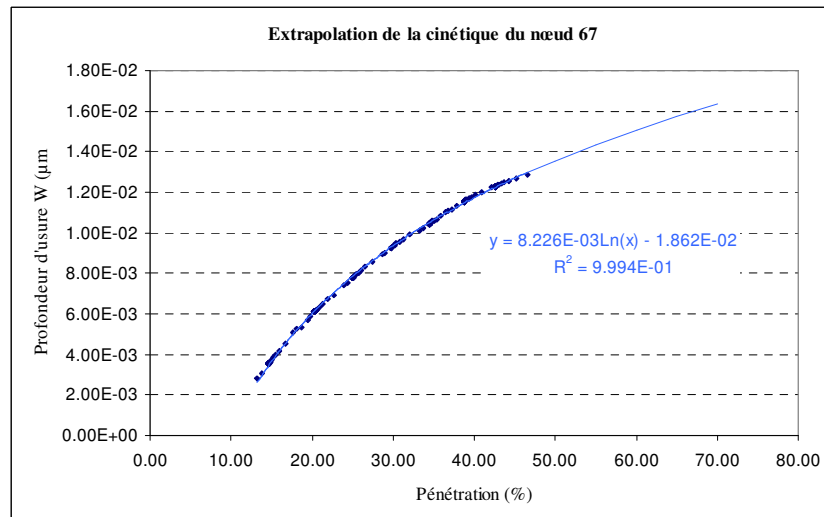


Figure 5. 31 : Extrapolation de l'usure à l'aide de courbes de tendance au nœud 67 du poinçon

En effectuant cette opération pour différents nœuds du poinçon et en reportant les valeurs obtenues à l'aide de la méthode des normales, nous obtenons un profil théorique usé pour 70% de pénétration :

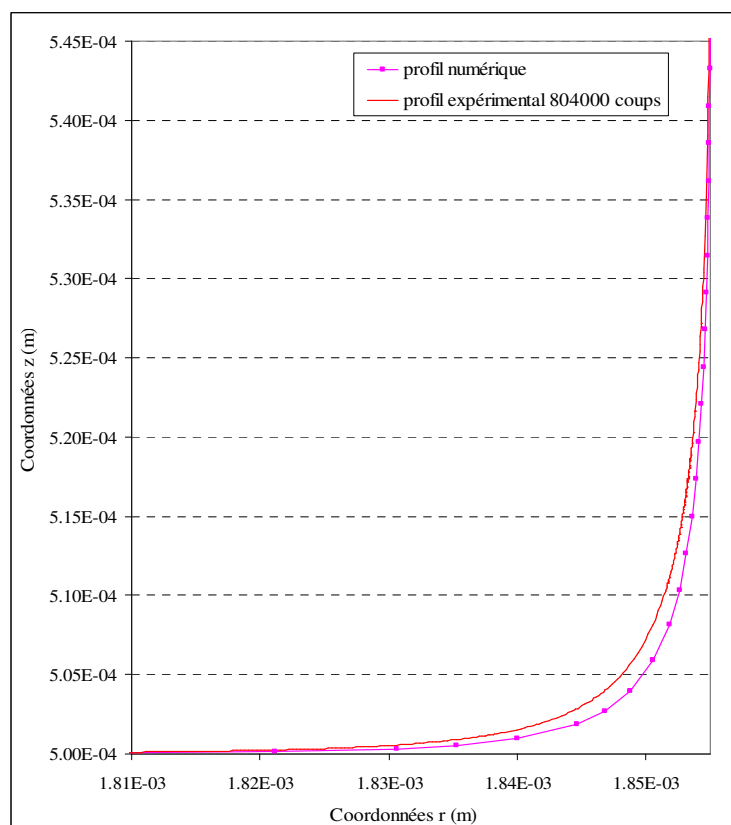


Figure 5. 32 : Profil numérique calculé et profil expérimental prévu à 804 000 coups

Sur cette figure on constate que l'usure calculée est inférieure à l'usure réelle mesurée expérimentalement. Pour mieux comparer ces 2 profils, on applique un facteur multiplicateur

à la profondeur d'usure simulée. Le profil issu de cette opération en prenant un facteur multiplicatif de 50 (pour se rapprocher de l'ordre de grandeur constaté expérimentalement) est présenté sur *la figure 5.33*.

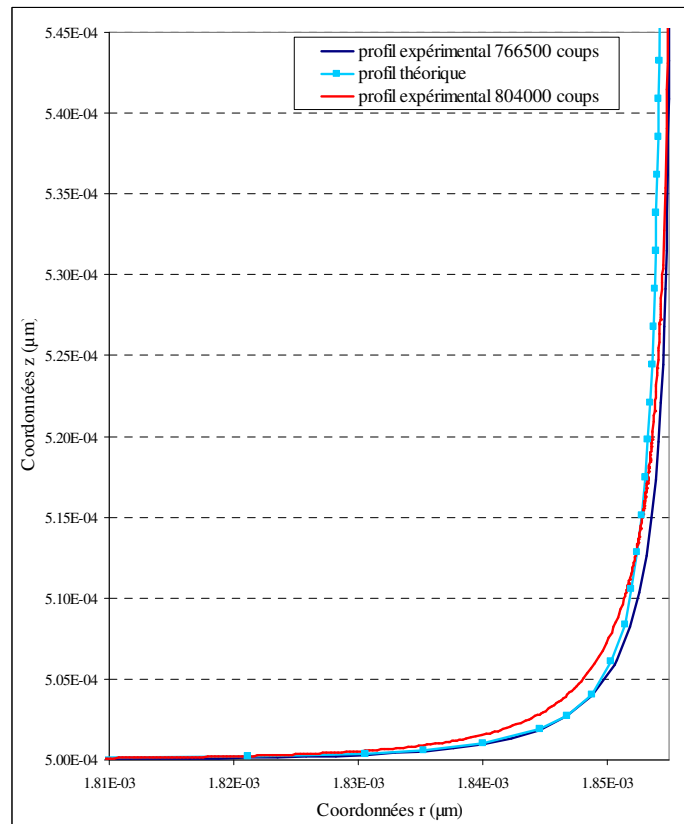


Figure 5. 33 : Profils expérimentaux et théorique (écart de 37500 coups de presse, valeurs $\times 50$)

On retrouve bien le fait que l'usure se fait en grande partie sur la partie latérale du poinçon, mais la partie arrondie où se trouve le maximum d'usure d'après les courbes expérimentales est absente sur le profil usé calculé.

5.5.3. Bilan de la confrontation

Comme mentionné plus haut, le profil d'usure prédit numériquement montre seulement une usure sur la partie latérale de l'arête du poinçon. Néanmoins, l'usure calculée est globalement faible. De plus, l'arrondi de ce profil est affecté par une usure faible, contrairement à un profil expérimental. Pour expliquer cette différence entre les deux profils nous pouvons émettre plusieurs hypothèses.

5.5.3.1. Hypothèses liées à la démarche expérimentale

- ↳ En modélisant le profil d'usure expérimental par une courbe parfaite, on supprime la rugosité de la surface du poinçon réel, qui peut être à l'origine de concentrations de

contraintes. Cela induit une usure plus importante le long du profil de l'arête du poinçon. Cet état de surface est difficilement modélisable, car il entraînerait des problèmes numériques au niveau du contact poinçon / tôle.

- ✧ La représentation du profil réel par une courbe de forme exponentielle, modifie localement la morphologie de l'arête du poinçon. Cela induit une divergence entre l'usure calculée numériquement et l'usure mesurée expérimentalement.
- ✧ L'écart constaté sur les profils pourrait venir également de la technique de « double réplique » du poinçon. En effet nous avons observé un retrait (voir chapitre 3) du silicone lors du traitement des données expérimentales.

5.5.3.2. Hypothèses liées à la simulation numérique

- ✧ Comme nous n'effectuons qu'une simulation et que nous multiplions les résultats par le nombre de coups de presse, il est possible que ce dernier soit trop important et favorise trop la zone de faible usure. Il faudrait comparer le profil numérique avec un profil expérimental plus proche du point de vue du nombre de coups de presse.
- ✧ Nous avons vu au cours de l'analyse de sensibilité que la position de la zone de faible usure évolue selon la taille du rayon de congé. Cette dernière a tendance à se déplacer sur la gauche (vers le centre du poinçon) lorsque le rayon augmente. Comme cette zone évolue en fonction des coups de presse effectués, l'usure des autres parties du poinçon en sera affectée. Il convient donc de déterminer à partir de combien de coups de presse nous pouvons calculer un profil numérique avant que sa morphologie ne change de façon significative. En outre, on ne peut pas simplement projeter les valeurs d'usure selon la normale au profil en les multipliant par l'écart de 37 500 coups de presse, puisque la zone de faible usure évolue en fonction le nombre de coups de presse.
- ✧ La simulation de la découpe se fait seulement dans la phase de descente du poinçon, et sans rupture de la matière de la tôle. Par expérience, nous savons qu'après la phase de rupture et de remontée du poinçon, celui-ci subit une forte contrainte de la part de la tôle. Cela participe probablement à l'usure de l'arête et surtout à l'usure sur la surface latérale du poinçon.
- ✧ La loi d'usure d'Archard est utilisée par défaut dans l'algorithme de calcul. Toutefois, les contributions de la pression et du glissement sur la profondeur d'usure ne semblent pas équivalentes. En effet, nous soupçonnons que le glissement a plus d'impact que la pression sur l'usure de l'arête du poinçon.

- ✧ Nous pouvons également émettre l'hypothèse que le poinçon n'est peut-être pas parfaitement centré dans la matrice. Cela conduirait à une usure inhomogène sur le contour du poinçon, et donc à des profils d'usure différents. Ce qui paraît probable compte tenu des inhomogénéités de répartition de bavure.
- ✧ Dans le modèle numérique, le frottement poinçon / tôle n'est pas pris en compte. De plus, le coefficient d'usure utilisé a été mesuré sans que le dispositif ne soit lubrifié, alors que le procédé de découpage fait intervenir une lubrification à l'huile. Une fois le tribomètre de laboratoire sera opérationnel ce défaut pourra être levé.

5.6. Conclusion

Ce chapitre présente une modélisation de l'usure fondée sur une problématique d'origine industrielle. En effet, le but de ces travaux est de prédire un profil d'usure d'un poinçon de découpe permettant de remonter à son usure totale. Dans ce sens, une modélisation du procédé de découpage a été mise en place, visant la réalisation d'une première approche pour estimer un profil d'usure sur un poinçon. Pour cela, un algorithme de calcul de l'usure a été établi, à partir de la loi d'Archard. Cet algorithme comporte une étape de report des données des nœuds de la tôle sur les nœuds du poinçon, afin d'estimer la profondeur d'usure des nœuds du poinçon.

Lors d'une opération de découpage, les éléments finis de la tôle subissent de grandes déformations. Il est alors nécessaire d'opérer plusieurs remaillages, de façon à conserver une bonne précision dans le calcul par éléments finis. Le remaillage est particulièrement nécessaire dans notre cas d'étude, dans la mesure où nous souhaitons obtenir une pénétration équivalente à 70% de l'épaisseur, en intégrant un profil usé du poinçon sous *ABAQUS*® pour calculer son évolution en fonction du nombre de coups de presse.

Par la suite, une première confrontation est réalisée entre un profil obtenu numériquement et un profil d'usure expérimental. Les résultats sur les profils montrent une différence au niveau général de la forme finale. Néanmoins, malgré le niveau faible d'usure calculée, une correspondance des zones d'usure est constatée entre les deux profils. En effet, sur le profil numérique on observe une usure même minime sur la partie verticale et dans l'arrondi du poinçon.

Conclusions générales et perspectives

A. Synthèse des résultats et discussions

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire concernent l'étude de la qualité des produits obtenus par un découpage progressif, et destinés au milieu industriel de l'électronique et de la micromécanique.

Généralement, compte tenu du cahier de charges de ces produits, le critère géométrique retenu pour définir leur qualité est souvent le niveau de bavure présente sur le support après découpage. D'autre part, dans toutes les applications utilisant des tôles découpées, la mesure de la bavure constitue un indice sur la qualité des arêtes de découpe des poinçons. Une bavure trop importante signe une découpe par un outil usé, et sa quantité est considérée comme le meilleur critère afin de procéder à la maintenance des outils. Ces implications traduisent le niveau de conformité dimensionnelle et les tolérances étroites exigées dans l'industrie du découpage.

Toutes ces considérations nous ont conduit à porter une attention particulière au suivi de l'évolution de l'usure des poinçons et de la bavure pendant des essais expérimentaux de découpage afin d'établir une corrélation entre l'usure d'un poinçon et la quantité de bavure formée sur un bord découpé.

Au cours de nos travaux, nous avons procédé à une analyse qualitative et quantitative des différents aspects du procédé, de manière expérimentale puis numérique.

Concernant le côté expérimental, puisque la réussite d'un processus de découpage dépend principalement des caractéristiques des tôles, de la forme des outils et de la lubrification, nous nous sommes attachés dans un premier temps à établir une liste d'essais expérimentaux permettant de faire varier ces différents paramètres. Ces essais de découpage ont été réalisés dans des conditions industrielles similaires à celles du découpage progressif de supports pour des circuits électroniques.

Nous avons pu étudier la dégradation des poinçons en carbure de tungstène par usure abrasive et les paramètres y contribuant, à travers l'utilisation de méthodes précises, qui

peuvent être appliquées à des volumes usés très faibles. Premièrement la mesure d'usure par activation superficielle consiste à soumettre un poinçon de découpe à une activation sélective (sur la zone de découpe) par un faisceau de particules. Celle-ci ne modifie pas les propriétés mécaniques du matériau du poinçon. L'évolution de l'usure du poinçon en fonction du nombre de coups de presse a été évaluée avec une mesure périodique de l'activité résiduelle du poinçon, ce qui permet la mesure « in situ » de l'usure sans démontage de l'outil. Ainsi, les conditions de découpe, notamment le jeu poinçon / matrice, restent inchangées.

La deuxième méthode employée pour l'évaluation de l'état de l'usure des poinçons est la mesure par « double réplique ». Cette méthode offre, quant à elle, la possibilité d'accéder aux relevés topographiques des profils d'usure sur une arête de découpe. Une méthode permettant de remonter à l'usure totale de chaque poinçon en fonction du nombre de coups de presse, à l'aide des profils d'usure, a été élaborée. Elle est basée sur une intégration de l'équation du profil d'usure autour de l'axe du poinçon.

Ces deux techniques de mesure nous ont permis de réaliser un suivi régulier de l'usure en fonction du nombre de pièces découpées. Ainsi, l'utilisation de ces techniques a démontré qu'il est possible de mesurer l'usure « in situ » avec une précision suffisante, l'ordre de grandeur de l'usure finale d'un poinçon cylindrique de diamètre 3.7mm étant de quelques micromètres ou dizaines de micromètres. D'autre part, nous avons pu observer notamment que le paramètre matériau a une influence marquée sur la cinétique d'usure des poinçons, et plus précisément la microstructure de ces tôles et leur richesse en précipités. Le paramètre lubrifiant a montré également une influence significative sur la vitesse d'usure des poinçons, ce qui peut permettre une sélection des huiles de découpe et l'optimisation des paramètres de lubrification.

Toutefois, nous n'avons pas pu effectuer des mesures d'usure des poinçons en utilisant les deux méthodes sur un même essai. Il serait donc intéressant de confronter ces deux mesures dans le but de valider définitivement les résultats de la technique par double réplique.

Les résultats de mesure d'usure issus des techniques précitées nous ont permis d'initier d'autres investigations pour développer d'autres techniques de mesure de l'usure d'un poinçon (basées sur des mesures optiques). Il s'agit de s'affranchir de quelques contraintes de mesures rencontrées lors de nos essais expérimentaux, notamment le temps de préparation et de réalisation des mesures et leurs préparations. Il serait souhaitable de vérifier ultérieurement que ces méthodes répondent à l'impératif d'une précision aussi importante que celle des techniques déjà utilisées.

L'exploitation et l'examen des mesures de l'usure des poinçons, s'est poursuivi par la corrélation de ces données avec l'évaluation précise de la quantité de bavure formée sur les pièces découpées. En effet, il a été nécessaire de disposer de cette dernière donnée au fur et à mesure de l'apparition de la bavure. Pour ce faire, il a fallu relever des échantillons de pièces découpées en continu au cours du processus de découpage. Nous avons donc dû identifier et mettre au point une méthodologie de caractérisation permettant de mesurer le niveau de bavure avec une précision suffisante. En outre, la métrologie du volume de bavure établie au cours de notre travail surmonte les difficultés habituelles pour de pareilles mesures. Il s'agit

principalement de sa présence inhomogène sur les contours découpés et de la faible épaisseur des bavures formées. L'analyse des résultats de cette métrologie montre le caractère prépondérant de l'influence de la nature des tôles découpées sur la formation de bavure.

La caractérisation et le suivi du profil de découpe dans l'épaisseur des tôles ont été également effectués en fonction du nombre de pièces découpées. Les effets des paramètres étudiés au cours des essais ont été déterminés et quantifiés sur les tôles testées.

Pour élargir la base expérimentale de ce travail, d'autres paramètres devraient être pris en compte pour la caractérisation de la qualité de la découpe. Avec par exemple l'étude de :

- ↳ L'influence de la nature des matériaux d'outils,
- ↳ L'influence du jeu poinçon / matrice,
- ↳ L'influence de la cadence de découpe,
- ↳ L'influence de la géométrie du poinçon,
- ↳ L'influence de la raideur du dévêtitseur,
- ↳ L'influence de la pénétration du poinçon dans la matrice.

Parallèlement aux essais de découpage, nos travaux expérimentaux se sont poursuivis par la mise en place d'une simulation expérimentale du mécanisme d'abrasion dans le couple poinçon / tôle. Ceci a été réalisé sur un système de tribométrie conçu spécifiquement pour notre étude et permettant un défilement continu de la tôle en frottement sur un pion sphérique en carbure de tungstène. Le protocole de cet essai recrée les conditions de frottement du poinçon sur la tôle, qui est caractérisé par le renouvellement continu de la surface de la tôle. Le relevé du volume usé par chaque nuance de tôle testée sur les billes en carbure de tungstène a permis de mesurer des coefficients d'usure pour chaque couple. Ainsi, l'abrasivité des tôles vis-à-vis de la matière du poinçon a été quantifiée.

Le test d'abrasion réalisé sur ce tribomètre de type ouvert, a montré la linéarité de la relation liant la longueur de glissement et le volume usé des billes, vérifiant la loi d'Archard, permettant de calculer les coefficients d'usure. Ce tribomètre se révèle un outil prometteur, permettant de dégager des tendances pour l'usure des poinçons en fonction des paramètres utilisés lors de la découpe. Par conséquent, la construction d'un d'essai recréant, en laboratoire, les conditions propices d'un contact poinçon / tôle semble possible afin d'éviter les essais de découpage sur presse. Cette démarche permettrait alors de disposer d'un système dont les variables sont maîtrisées, et dont l'utilisation n'entrave pas la ligne de production.

A la suite de ces études expérimentales du tribosystème poinçon / tôle, nous avons mené une réflexion sur la façon de valoriser les résultats tribologiques et surtout le coefficient d'usure en vue d'une intégration à la prédiction numérique de l'usure d'un poinçon. Pour ce faire, une modélisation numérique par éléments finis du procédé de découpage a été réalisée. Le but de cette étape était de vérifier la pertinence d'une approche de prédiction numérique d'un profil d'usure sur l'arête d'un poinçon en fonction du nombre de pièces découpées. Cette tâche a été réalisée à l'aide d'un algorithme de calcul de la profondeur d'usure sur l'arête d'un poinçon en utilisant la loi d'Archard.

Les premiers résultats issus de cette prédiction sont encourageants. Ils mettent en évidence des différences de niveau d'usure sur l'arête de découpe. Cela permet d'obtenir une première approche numérique du profil usé d'un poinçon.

A terme, ce travail de recherche permettrait de réaliser des progrès importants dans la caractérisation d'une opération de découpage. Il a contribué à alimenter la banque d'outils de mesure et de caractérisation du découpage d'alliages cuivreux en faibles épaisseurs.

Le travail d'investigation mis en œuvre dans le cadre de cette thèse doit permettre de sélectionner parmi les paramètres technologiques liés au procédé de découpage progressif, ceux dont l'influence est prépondérante sur la qualité des pièces découpées. De plus, une partie de ces études peuvent dorénavant être effectuées sans la mise en place d'essais sur presse longs et coûteux.

Le travail réalisé ici montre qu'il est possible d'envisager, à plus long terme, une procédure d'optimisation automatique consistant en une chaîne de simulations expérimentales et numériques, intégrant à la fois la phase d'investigation en laboratoire et la simulation numérique du procédé de découpage.

Bibliographie

- [Archard 1953] Archard, J.F. « Contact and rubbing of flat surfaces » *Journal of Applied Physics*, vol. 24, pp. 981-988, 1953.
- [Archard 1953] Archard, J.F., Hirst, W., « The Wear of Metals under Unlubricated Conditions » *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 236, No. 1206, pp. 397-410, 1956.
- [Askouri 1975] Askouri, Chen, Ettinger, Fremlin, Nowotny, Wills « On-line wear monitoring by surface activation », *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, vol. 26, pp. 61-70 – 1975.
- [Atom 1980] Atom, « Thin layer activation for materials analysis » vol. 287, pp. 233-237, 1980.
- [Balendra 1970] Balendra, R., Travis, F.W. « Static and dynamic blanking of steel of varying hardness » *International Journal of Machine Tool Design and Research*, vol. 10, pp. 249-271, 1970.
- [Brokken 1998] Brokken, D., Brekelmans W.A.M., Baaijens F.P.T., « Modelling ductile fracture in the metal blanking process » *Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications*, Huétink & Baaijens (eds), Balkema, Rotterdam, pp. 967-972, 1998.
- [Brokken 1999] Brokken, D., « Numerical modelling of ductile fracture in blanking » Thèse à l'université d'Eindhoven, 1999.
- [Brokken 2000] Brokken D., Brekelmans W.A.M., Baajens F.P.T., « Predicting the shape of blanked products: a finite element approach » *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 103, pp. 51-56, 2000.
- [Chang 1950] Chang, T.M., « Shearing of metal blanks » *Journal of Japan Institute of Metals*, pp. 393-414, 1950.
- [Conlon 1974] Conlon, « Thin layer activation by accelerated ions application to measurement of industrial wear », *Wear*, vol. 29, pp. 69-80, 1974.
- [Fang 2002] Fang, G., Zeng, P., « Finite element simulation of the effect of clearance on the forming quality in blanking process » *Journal of Materials Processing Technology*, 5684, pp. 1-6, 2002.
- [Faura 1996] FAURA, F., LOPEZ, J., SEBASTIAN M.A., LUIS, C., « Blanking of stainless steel: tool life equation model » *Proceedings of the 5th international conference on the technology of plasticity*, Columbus, Ohio, USA, pp. 655-664 - 1996.

- [Faura 1998] Faura, F., Garcia, A., et Estrems, M., « Finite element analysis of optimum clearance in the blanking process » *Journal of Materials Processing Technology*, 80-81: 121-125, 1998.
- [Felder 2006] Felder, E. « Lubrification des surfaces lors de la mise en forme » *Techniques de l'ingénieur*, M 597, 2006.
- [Goijaerts 1999] Goijaerts, A.M., « Prediction of ductile fracture in metal blanking ». à l'université d'Eindhoven, 1999.
- [Goijaerts 2000] Goijaerts, A.M., Stegeman, Y.W., Govaert, L.E., Brokken, D., Brekelmans, W.A.M., Baaijens F.P.T. « Can a new experimental and numerical study improve metal blanking? » *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 103, pp 44-50, 2000.
- [Goijaerts 2001] Goijaerts, A.M., Govaert, L.E. et Baaijens, F.P.T., « Evaluation of ductile fracture models for the different metals in blanking » *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 110, 312-323, 2001.
- [Gréban 2006] Gréban F., « Découpabilité du cuivre et des alliages cuivreux » Thèse à l'Université de FRANCHE-COMTÉ, Besançon, France, 2006.
- [Gréban 2007] Gréban F., Monteil G., Roizard X., « Influence of the structure of blanked materials upon the blanking quality of copper alloys » *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 186, 27-32, 2007.
- [Grünbaum 1996] Grünbaum, M., Breitling, J., Altan, T., « Influence of high cutting speeds on the quality of blanked parts » ERC report N°5-96-19, Université de Stuttgart, Allemagne, 1996.
- [Hallquist 1985] Hallquist J.O., Goudreau G.L., Benson D.J., « Sliding interfaces with contact-impact in large-scale lagrangian computations », *Comp. meth. In Appl. Mech. and Eng.*, Vol. 51, pp. 107-137, 1985.
- [Hambli 1996] Hambli R., « Etude expérimentale, numérique et théorique du découpage des tôles en vue de l'optimisation du procédé » Thèse ENSAM d'Angers, France, 1996.
- [Hambli 2001-a] Hambli R., « Finite element model fracture prediction during sheet metal blanking processes », *Eng. Frac. Mech.*, vol. 68 , pp. 365-378, 2001.
- [Hambli 2001-b] Hambli, R., « Comparison between Lemaitre and Gurson damage models in crack growth simulation during blanking process » *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 43 pp. 2769-2790, 2001.
- [Hambli 2001-c] Hambli, R., « Blanking tool wear modeling using the finite element method » *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 41, pp. 1815-1829, 2001.
- [Hambli 2002-a] Hambli, R., Reszka, M., « Fracture criteria identification using an inverse technique method in blanking experiment » *International Journal of Mechanical*

Sciences, vol. 44, pp. 1349- 1361, 2002.

- [Hambli 2002-b] Hambli, R., « Prediction of burr height formation in blanking processes using neural network » International Journal of Mechanical Sciences, vol. 44, pp. 2089-2102, 2002.
- [Hambli 2003] Hambli, R., « BLANKSOFT: a code for sheet metal blanking processes optimization » Journal of Materials Processing Technology, vol. 141, pp. 234 – 242, 2003.
- [Hambli 2004] Hambli, R., Potiron A., « Modélisation et simulation du découpage des tôles » Techniques de l'ingénieur, BM 7 505, 2004.
- [Hatanaka 2003] Hatanaka, N., Yamaguchi, K., Takakura, N., Iizuka T., « Simulation of sheared edge formation process in blanking of sheet metals » Journal of Materials Processing Technology, vol. 140, pp. 628-634, 2003.
- [Hernandez 2006] Hernandez, J. J., Franco, P., Estrems, M., Faura, F., « Modelling and experimental analysis of the effects on tool wear on form errors in stainless steel blanking » Journal of Materials Processing Technology, vol. 180, pp.143-150, 2006.
- [Homsy 1996] Homsy, M., Morancay, L. et Roelandt, J.M., « Technique de remaillage appliquée au découpage de métaux ». Revue Européenne des éléments finis, vol. 5 pp. 297-321, 1996.
- [Husson 2005] Husson, C., Poizat, C., Daridon, L., Ahzi, S., « Travail des métaux en feuilles - Simulation numérique 2D du découpage d'alliages de cuivre » 7ème Colloque National en Calcul des Structures. Lavoisier, 2, pp. 383-388, 2005.
- [Toshihiro 1989] Ioi Toshihiro, Matsunaga Masahisa, Osada Tomoaki, Koubuchi Hidetoshi « On the sensing system for burr of castings » SME Technical Paper (Series) MR 89-238, 1989.
- [Jeanneau 1981] Jeanneau, « Etudes d'usure de pièces mécaniques à l'aide de technique nucléaire » Publications CEA, 1981.
- [Johnson 1967] Johnson, W., Slater, R.A.C., « A survey of the slow and fast blanking of metals at ambient and high temperatures » The International Conference of Manufacturing Technology, pp. 825-851, 1967.
- [Kals 1998] Kals, R., Eckstein, R. « Minimization in sheet metal working ». 6th Int. Conf. on Sheet Metal (SheMet98), pp. 15-24, 1998.
- [Kapsa 2001-a] Kapsa, P., Cartier, M., « Usure des contacts mécaniques – Problématique et définitions » Techniques de l'ingénieur, BM 5 065, 2001.
- [Kapsa 2001-b] Kapsa, P., Cartier, M., « Usure des contacts mécaniques – Manifestations de l'usure » Techniques de l'ingénieur, BM 5 067, 2001.
- [Klingenberg 2003] Klingenberg, W., Singh, U.P., « Finite element simulation of the punching/blanking process using in process characterization of mild steel » Journal of

Materials Processing Technology, vol. 134, 296-302, 2003.

- [Ko 1997] Ko, D.C., Kim, B.M. et Choi, J.C., « Finite element simulation of the shear process using the element-kill method » Journal of Materials Processing Technology, vol. 72, pp. 129-140, 1997.
- [Ko 2006] Ko SL, Park SW, 2006. Development of an effective measurement system for burr geometry. Proceedings of the institution of mechanical engineers part b-journal of engineering manufacture Volume: 220 Issue: 4 Pages: 507-512
- [KWAK 2002] Kwak, T.S., Kim, Y.J et Bae, W.B., « Finite element analysis on the effect of the die clearance on shear planes in fine blanking ». Journal of Materials Processing Technology, vol. 56, pp. 462-468, 2002.
- [Laroux 1998] LaRoux, « Inspecting for burrs by Gillespie » 1998 Manufacturing Engineering 120 (4), pp. 70, 72, 74, 1998.
- [Lemiale 2004] Lemiale, V., « Contribution à la modélisation et à la simulation numérique du découpage des métaux » Thèse à l'Université de Franche-Comté, Besançon, 2004.
- [Leroy 1993] Leroyv F., « Endommagement des outils de coupe » Techniques de l'ingénieur, BM 7 042, 1993.
- [Leung 2004] Leung, Y.C., Chan, L.C., Tang, C.Y. Et Lee, T.C., « An effective process of strain measurement for sever and localized plastic deformation » International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 44, pp. 669-676, 2004.
- [Levy 2000] Levy, E., « Mise en oeuvre des systèmes de vision pour le contrôle des pièces découpées », Document interne Statimage, 2000.
- [Li 2000] Li, M., « An experimental investigation on cut surface and burr in trimming aluminium autobody sheet » International Journal of Mechanical Sciences, vol. 42, pp. 889-206, 2000.
- [Luo 1997] Luo, S.Y., « Studies on the wear conditions and the sheared edges in punching » Wear, vol. 208, pp. 81-90, 1997.
- [Luo 1999] Luo, S.Y., « Effect of the geometry and the surface treatment of punching tools on the tool life and wear conditions in the piercing of thick steel plate », Journal of Materials Processing Technology, vol. 88, pp. 122-133, 1999.
- [Maeda 1974] Maeda, T., Aoki, I., « The study on wear of blanking tool for 18-8 stainless steel and bainite hardened steel strips » Journal of the faculty of engineering, the university of Tokyo, Vol.XXXII, n°3, pp. 443-475, 1974.
- [Maillard 1991] « Etude expérimentale et théorique du découpage » Thèse à l'Université de Compiègne, France, 1991.
- [Meunier 2005] Meunier, S., « Analyse expérimentale du découpage progressif de

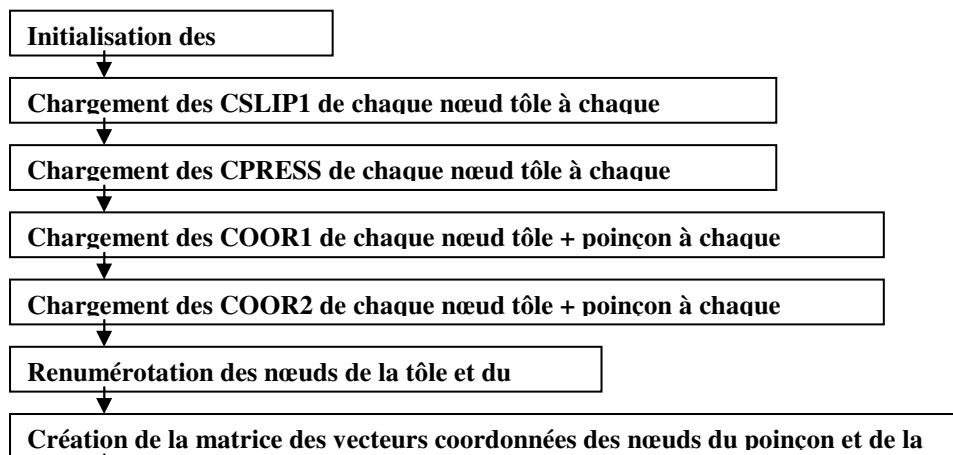
précision a grande vitesse d'un alliage cuivreux en faible épaisseur » Thèse à l'Université de Franche-Comté, Besançon, 2005.

- [Monteil 2008] Monteil, G., Roizard, X., Gréban, F., Makich, H., « Description of an in situ method to measure the punch wear during blanking » vol. 40, pp. 871–874, 2008.
- [Myo Hla 2003] Myo Hla Myint, Fuh, J.Y.H., Wong, Y.S., Lu, L., Chen, Z.D., Choy, C.M. « Evaluation of wear mechanisms of Y-TZP and tungsten carbide punches » Journal of Materials Processing Technology, vol. 140, pp. 460-464, 2003.
- [Nakao 2006] Nakao, Y., Watanabe, Y., « Measurements and evaluations of drilling burr profile » Proceedings of the institution of mechanical engineers part b-journal of engineering manufacture, vol. 220, Issue: 4, pp. 512-523, 2006.
- [Nathan 1966] Nathan, G.K., Jones, W.J.D., « The empirical relationship between abrasive wear and the applied conditions » Wear, vol. 9, pp. 300-309, 1966.
- [Natter 1987] Natter, « Etude de l'usure et de l'écaillage de pièces d'un réacteur d'avion par la technique d'activation en couches superficielles » Thèse à l'université Louis Pasteur, Strasbourg CRN, 1987.
- [Noble 1963] Noble, C.F., Oxley, P.L.B., « Crack formation in blanking and piercing » International Journal of Production Research, vol. 2, pp. 265-275, 1963.
- [Pijaudier 1987] Pijaudier-cabot, G., Bazant, Z.P., « nonlocal damage theory » ASCE J. ENG. Mech. vol. 113, pp. 1512-1533, 1987.
- [Post1996] Post, J., Voncken, R. « FEM analysis of blanking process ». 4th Int. Conf. on Sheet Metal (SheMet96), pp. 159-169, 1996.
- [RACHIK 2002] Rachik, M., Roelandt, J.M., Maillard, A., « Some phenomenological and computational aspects of sheet metal blanking simulation ». Journal of Materials Processing Technology, vol. 128, pp. 256-265, 2002.
- [Shin 2005] Shin, H.G., Shin, Y.S., Kim, B.H., « Burr control in meso-punching process. Journal of mechanical science and technology » vol. 19, Issue: 4, pp. 968-975, 2005.
- [Söderberg 2006] Söderberg, M., « Finite element simulation of punching », Master's thesis, Lulea University of technology, 2006.
- [Song 2007] Song, Y, Xiaolong, X, Jie, Z, Zhen, Z, « Ductile fracture modeling of initiation and propagation in sheet-metal blanking processes » Journal of Materials Processing Technology, vol. 187-188, pp. 169-17212, 2007.
- [Stegeman 1999] Stegeman, Y.W., Goijaerts, A.M., Brokken, D., Brekelmans, W.A.M., Govaert, L.E., Baaijens, F.P.T., « An experimental and numerical study of a planar blanking process » Journal of Materials Processing Technology, vol. 87, pp. 266-276, 1999.

- [Taupin 1996] Taupin, E., Breitling, J., Wei-Tsu Wu, Altan, T., « Material fracture and burr formation in blanking results of FEM simulations and comparison with experiments » *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 59, pp. 68-78, 1996.
- [Tekiner 2006] Tekiner, Z., Nalbant, M., Gürün H., « An experimental study for the effect of different clearances on burr, smooth-sheared and blanking force on aluminium sheet metal » *Materials & Design*, vol. 27, pp. 1134-1138, 2006.
- [Tilsley 1958] Tilsley, R., Howard, F., « Recent investigations into the blanking and piercing of sheet materials ». *Machinery*, vol. 93, pp. 151-158, 1958.
- [Touache 2006] Touache A., « Contribution à la caractérisation et à la modélisation de l'influence de la vitesse et de la température sur le comportement en découpage de tôles minces » Thèse à l'Université de Franche-Comté, Besançon, 2006.
- [Trapied 1981] Trapied, G., « Mise en forme du cuivre et des alliages de cuivre » *Techniques de l'ingénieur*, M 660, 1981.
- [Triouleyre 1980] Triouleyre, J., « Procédés de formage » *Collection Techniques et Normalisation*, Delagrave, 1980.
- [Tvergaard 1997] Tvergaard, V., Needleman, A., « Nonlocal effects on localization in a void-sheet » *Int. J. Solids Structures*, vol. 34, pp. 2221-2238, 1997.
- [Woydt 2004] Woydt, M., « Application des données tribologiques des matériaux » *Techniques de l'ingénieur*, BM 7 006, 2004.
- [YOSHIDA 2001] Yoshida, Y., Ukawa, N. et Ishikawa, T., « Deformation analysis of the shearing process considering fracture ». *Int. Conf. NUMIFORM01*, pp. 959-964, 2001.

Annexe Chapitre 5

Algorithme de calcul de l'usure d'un poinçon



$$X_j = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{matrix} P1 \\ P2 \\ P3 \\ \cdot \\ Pj \\ \cdot \end{matrix}$$

$$Y_i = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{matrix} T1 \\ T2 \\ T3 \\ \cdot \\ Ti \\ \cdot \end{matrix}$$

1 2 ↘_n

Fonction de pondération

Calcul des normes des vecteurs $|X_j - Y_i|$

$$|\vec{X}_j - \vec{Y}_i| = \sqrt{(X_{j/1} - Y_{i/1})^2 + (X_{j/2} - Y_{i/2})^2}$$

$$\text{norm_}X_j Y_i = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{matrix} P1 \ P2 \ \cdot \ Pj \\ T1 \\ T2 \\ \cdot \\ Ti \end{matrix}$$

↘_n

Formulation de la fonction de

$$Lc = K.dp$$

selon Pijaudier

$$\text{Phi_1} = \exp(-(\text{norm_}X_j Y_i^2) / (Lc^2))$$

$$\text{Phi_1} = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{matrix} X1 \ X2 \ \cdot \ Xj \\ \varphi(X_j - Y1) \\ \varphi(X_j - Y2) \\ \cdot \\ \varphi(X_j - Y_i) \end{matrix}$$

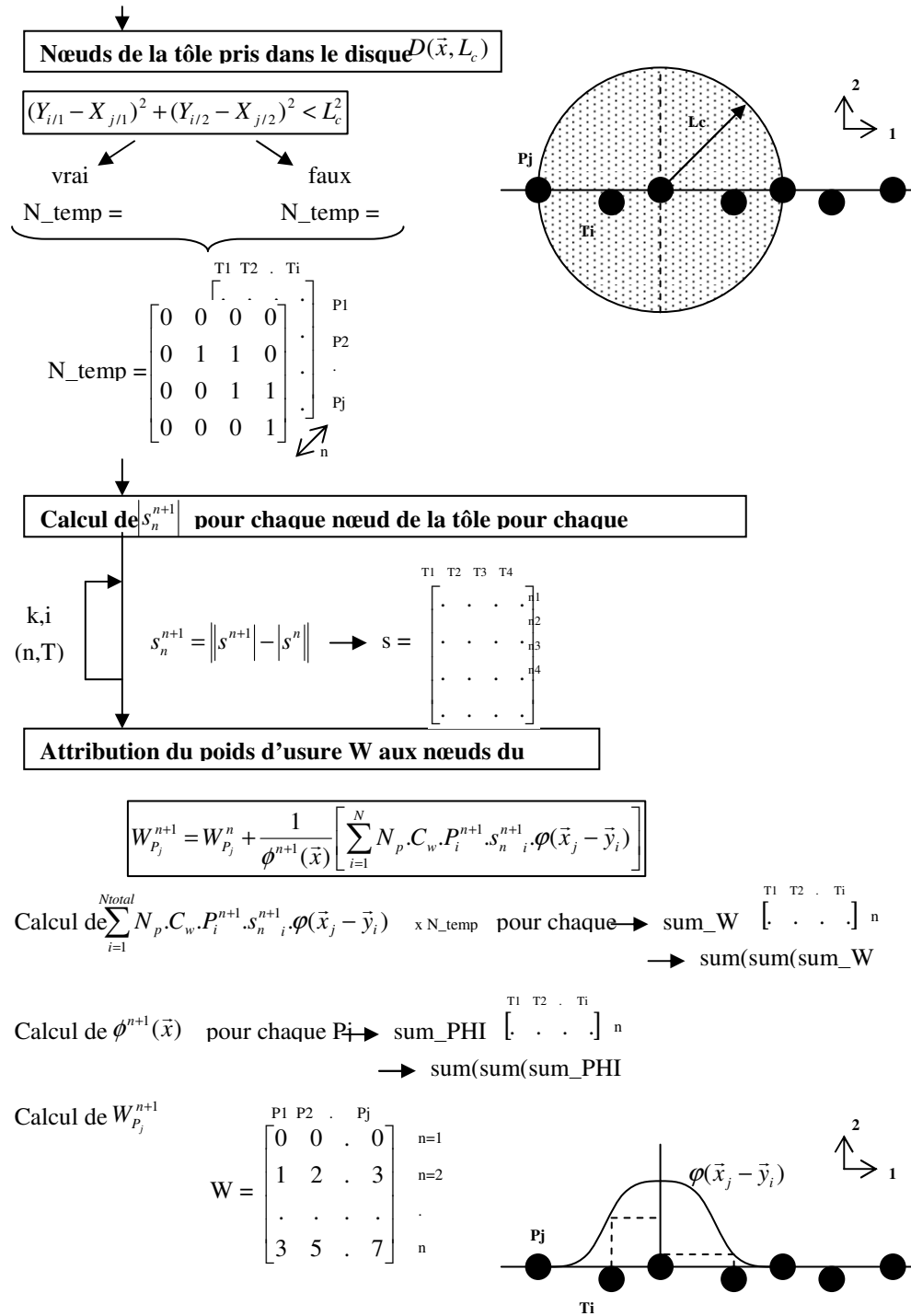
↘_n

selon Tvergaard

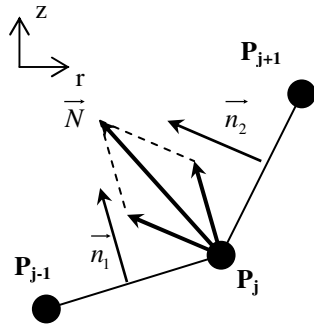
$$\text{Phi_2} = (1 / (1 + (\text{norm_}X_j Y_i / Lc)^8))^2$$

$$\text{Phi_2} = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{matrix} X1 \ X2 \ \cdot \ Xj \\ \varphi(X_j - Y1) \\ \varphi(X_j - Y2) \\ \cdot \\ \varphi(X_j - Y_i) \end{matrix}$$

↘_n



Représentation du poinçon



$$\left. \begin{aligned} \overrightarrow{P_{j-1}P_j} &= \begin{pmatrix} r_j - r_{j-1} \\ z_j - z_{j-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 \\ z_1 \end{pmatrix} \\ \overrightarrow{P_jP_{j+1}} &= \begin{pmatrix} r_{j+1} - r_j \\ z_{j+1} - z_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_2 \\ z_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \mathbf{Pj} = \begin{bmatrix} \begin{matrix} P_1P_2 & P_{j-1}P_j \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{matrix} r_j \\ z_j \end{matrix} \begin{matrix} \nearrow \\ \nwarrow \end{matrix} \mathbf{n}$$

$$\begin{aligned} \text{Vecteur} \\ \overrightarrow{P_{j-1}P_j} \cdot \vec{n}_1 = 0 &\Leftrightarrow \begin{pmatrix} r_1 \\ z_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} n_{1r} \\ n_{1z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad d'où \left\{ \begin{aligned} r_1 n_{1r} + z_1 n_{1z} &= 0 \\ \|\vec{n}_1\| &= \sqrt{n_{1r}^2 + n_{1z}^2} = 1 \end{aligned} \right. \rightarrow \begin{cases} n_{1r} = -\frac{z_1}{\sqrt{r_1^2 + z_1^2}} \\ n_{1z} = \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + z_1^2}} \end{cases} \quad \text{Idem} \quad \vec{n}_2 \end{aligned}$$

$$\mathbf{nj} = \begin{bmatrix} \begin{matrix} n_j(P_1P_2) & n_j(P_{j-1}P_j) \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{matrix} n_{jr} \\ n_{jz} \end{matrix} \begin{matrix} \nearrow \\ \nwarrow \end{matrix} \mathbf{n}$$

Vecteur normal

$$\vec{N} = \vec{n}_1 + \vec{n}_2 \quad \text{grand_n} \quad \begin{bmatrix} \begin{matrix} n_j(P_1P_2) & n_j(P_{j-1}P_j) \\ +n_j(P_2P_3) & +n_j(P_{j-1}P_j) \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{grand_n}_r \\ \text{grand_n}_z \end{matrix} \begin{matrix} \nearrow \\ \nwarrow \end{matrix} \mathbf{n}$$

$$\vec{n} = \frac{\vec{N}}{\|\vec{N}\|} = \begin{pmatrix} n_r \\ n_z \end{pmatrix} \quad \left\{ \begin{aligned} \mathbf{n} &= \begin{bmatrix} \begin{matrix} n(P_2) & n(P_{j-1}) \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{matrix} n_r \\ n_z \end{matrix} \\ n(P_1) &= n_j(P_1P_2) \\ n(P_j) &= n_j(P_{j-1}P_j) \end{aligned} \right. \begin{matrix} \nearrow \\ \nwarrow \end{matrix} \mathbf{n}$$

Attribution de

$$\overrightarrow{jW} = W_j \vec{n} \quad \rightarrow \quad \mathbf{JW} = \begin{bmatrix} \begin{matrix} \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \end{matrix} \end{bmatrix} \begin{matrix} W \cdot n(P_1) \\ \cdot \\ \cdot \\ W \cdot n(P_j) \end{matrix} \begin{matrix} \nearrow \\ \nwarrow \end{matrix} \mathbf{n}$$

Résumé

La qualité des pièces découpées pour les industries électroniques et micromécaniques est appréciée via trois critères principaux : le niveau de bavure, l'aspect du bord découpé et la précision dimensionnelle. Or, l'étude de la qualité des pièces découpées ne peut se faire sans une compréhension de l'usure des poinçons. Ainsi, des méthodes de mesure en continu et *in situ* de l'usure ont été mises au point et validées, soit l'activation superficielle et la mesure par double réplique. Ainsi, il a été possible de suivre l'influence d'un certain nombre de paramètres du procédé sur l'évolution de l'usure lors du découpage.

Par ailleurs, nous avons mis au point une méthode de quantification de la bavure sur la totalité du contour découpé. Il a ainsi été possible d'étudier l'évolution de la bavure au cours de la découpe.

L'aspect des bords découpés a été examiné grâce à des relevés topographiques permettant le suivi de son évolution. Ainsi, une corrélation entre la cinétique d'usure des poinçons et l'apparition de la bavure a été établie. De plus, une simulation expérimentale de l'usure des poinçons a été entreprise. Un dispositif expérimental de tribométrie a été conçu et installé sur la ligne de presse, simulant les conditions de frottement d'un poinçon sur une tôle. Il a permis d'évaluer l'abrasivité des tôles minces vis-à-vis des poinçons.

Par ailleurs, une modélisation numérique de l'opération de découpage par éléments finis a été entreprise, permettant d'approcher le profil d'usure d'un poinçon de géométrie cylindrique. Et par conséquent la possibilité de prédire son évolution en fonction du nombre de pièces découpées devient accessible en fonction des paramètres du procédé.

Mots clés : Découpage, Quantité de bavure, Bavure écrasée, Usure des poinçons, Bord découpé, Mesure *in-situ*, Activation superficielle, Coefficient de l'usure, Tribomètre ouvert, Modélisation de l'usure

Abstract

The blanked parts quality for electronic and a micromechanical industry is assessed using three main criterions: the burr amount, the appearance of the cut edge and dimensional accuracy. However, the study of the quality of the blanked pieces can not be done without an understanding of the punches wear. Thus, methods for continuous and *in-situ* wear measurements have been developed and validated: Thin Layer Activation and measurement by double replica. Thus, it was possible to follow the influence of process parameters on the wear evolution during blanking.

In addition, we have developed a method for quantifying the burr on the entire blanked contour. It was thus possible to study the evolution of the burr during blanking. The appearance of the cut edges was

examined by means of topographic survey for monitoring its evolution. Thus, a correlation between the kinetics of punches wear and the appearance of the burr has been established. In addition, an experimental simulation of punches wear was undertaken. An experimental tribometry was designed and installed on the press line, simulating the conditions of friction of a punch on one sheet. It evaluated the abrasiveness of thin sheets against the punches.

Additionally, a numerical modelling of blanking was undertaken to approach the wear profile of a punch of cylindrical geometry. And therefore the ability to predict its evolution contingent on the number of blanked pieces becomes available depending on process parameters.

Keywords: Blanking, Burr amount, Crushed burr, Punch wear, Cut edge profile, *In-situ measurement*, Thin Layer Activation, Wear coefficient, Open tribometer, Wear modelling,